

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Změny zbytkových napětí v povrchových
vrstvách VBD po aplikaci povrchových úprav**

**Changes of Residual Stresses in Surface
Layers of Inserts after Application of Surface
Treatments**

Student:	Bc. Aneta Slaninková
Osobní číslo:	SLA0220
Vedoucí diplomové práce:	prof. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Aneta Slaninková**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Změny zbytkových napětí v povrchových vrstvách VBD po aplikaci povrchových úprav**
Changes of Residual Stresses in Surface Layers of Inserts after Application of Surface Treatments
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Zbytková napětí – druhy, jejich vliv na životnost nástrojů, možnosti měření zbytkových napětí.
3. Povrchové úpravy aplikovatelné na VBD.
4. Metodický postup experimentálních prací.
5. Vyhodnocení naměřených hodnot.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

CHOY, K.L. *Chemical Vapour Deposition (CVD) Advances, Technology and Applications*. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2019, 398 p. ISBN 978-1-4665-9776-1.
HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
JURKO, J. *Opatrebovanie rezných nástrojov*. 1. vydanie, Košice: TU v Košiciach, FVT so sídlom v Prešove, 2005, 110 s. ISBN 80-8073-255-8.

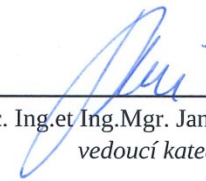
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Ivan Mrkvica**


Konzultant diplomové práce: Ing. Ondřej Vortel

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použila interní údaje od firmy Dormer Pramet s. r. o., Šumperk, firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 18. května 2020.

.....*Amela Glamirková*.....

Podpis studenta

Prohlášení spolupracující osoby

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v diplomových studijních programech VŠB -TU Ostrava.

Spolupracující společnost:

Dormer Pramet s.r.o

Uničovská 2

787 53 Šumperk, Česká republika

IČ: 25782983

Jméno a příjmení oprávněné osoby:

Ing. Ondřej Vortel

V Ostravě dne 18. května 2020.




.....

Podpis oprávněné osoby

Prohlašuji, že:

- jsem si vědoma, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.


.....

Podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SLANINKOVÁ, A. *Změny zbytkových napětí v povrchových vrstvách VBD po aplikaci povrchových úprav: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 76. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Ivan Mrkvica.

Diplomová práce se zabývá problematikou zbytkových napětí v povrchových vrstvách vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu povlakovaných chemickou depozicí par (CVD). Teoretická část pojednává o vlivu zbytkové napjatosti na životnost řezných nástrojů a možnostech měření zbytkových napětí. Experimentální část se věnuje technologii mokrého pískování, kdy je zkoumán účinek procesních parametrů dané technologie na velikost a charakter zbytkové napjatosti v povrchové vrstvě řezného nástroje. Na základě získaných výsledků bude cílem vyhodnotit optimální parametry metody mokrého pískování, které zajišťují vysokou úroveň opakovatelnosti výroby, snadnou kontrolovatelnost a celkovou stabilitu výrobního procesu s ohledem na trvanlivost obráběcího nástroje.

ANOTATION OF MASTER THESIS

SLANINKOVÁ, A. *Changes of Residual Stresses in Surface Layers of Inserts after Application of Surface Treatments: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 76 s. Thesis head: prof. Dr. Ing. Ivan Mrkvica.

The Master thesis deals with issue of residual stresses in surface treatments cutting inserts of cemented carbide deposited by chemical vapour deposition. The theory part describes technology of surface treatments on durability of cutting tools and possibility measurement of residual stresses. The experimental part is devoted to the technology of wet blasting, in which the effect of the process of parameters of the technology on the size and character of the residual stress in the surface layers of the cutting tool is investigated. On the basis of the obtained results, the aim will be to evaluate the optimal parameters of the wet blasting method, which ensure a high level of repeatability of production, easy controllability and overall stability of the production process with regard to the durability of cutting tools.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	9
ÚVOD	11
CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	12
1 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ A METODY MĚŘENÍ	13
1.1 Rozdělení zbytkových napětí	14
1.2 Vliv zbytkové napjatosti na trvanlivost řezného nástroje ze slinutého karbidu	15
1.2.1 Vývoj zbytkové napjatosti ve výrobním procesu VBD	16
1.3 Zbytková napjatost v deponovaných vrstvách	18
1.3.1 Chemická depozice z plynné fáze (CVD)	21
1.3.2 Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD)	26
1.3.3 Poškození řezného nástroje vlivem výskytu zbytkového napětí	27
1.4 Metody měření zbytkových napětí	29
1.4.1 Rentgenová difrakční tenzometrie	30
2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY PO POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	32
2.1 Mokrý pískování	33
2.1.1 Analýza současného stavu technologie mokrého pískování	34
3 METODICKÝ POSTUP EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE	38
3.1 Typ testovaného řezného nástroje	38
3.2 Pískovací stroj	39
3.3 Parametry procesu pískování	40
3.4 Pískovací médium	40
3.5 Funkční zkouška obrábění	42
3.5.1 Charakteristika použitého stroje	42
3.5.2 Volba řezného nástroje a řezných podmínek	43
3.6 Stabilita výrobního procesu	45
4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	48
4.1 Vyhodnocení zbytkové napjatosti	48
4.1.1 Vyhodnocení vlivu mokrého pískování na zbytkovou napjatost	50
4.1.2 Vyhodnocení funkční zkoušky obrábění	52
4.2 Vyhodnocení stability výrobního procesu	55

4.2.1	Vyhodnocení vlivu polohy VBD na zbytkovou napjatost	55
4.2.2	Vliv změny parametrů mokrého pískování na zbytkovou napjatost.....	63
4.2.3	Vyhodnocení vlivu pískovacího média na zbytkovou napjatost	66
ZÁVĚR A DOPORUČENÍ		69
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		73
SEZNAM PŘÍLOH.....		76

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
CVD	- chemická depozice vrstev.....	[-]
E1	- modul pružnosti v tahu pro povlak.....	[MPa]
E2	- modul pružnosti v tahu pro substrát	[MPa]
F	- napětí	[MPa]
L	- živostnost nástroje	[m]
PVD	- fyzikální depozice vrstev.....	[-]
S1	- plocha příčného průřezu pro povlak.....	[mm ²]
S2	- plocha příčného průřezu pro substrát	[mm ²]
SK	- slinutý karbid.....	[-]
T	- teplota	[°C]
T1	- výchozí teplota při depozici	[°C]
T2	- konečná teplota při depozici.....	[°C]
VBD	- vyměnitelná břitová destička.....	[-]
VB _{MAX}	- maximální opotřebení na hřbetě	[mm]
XDR	- rentgenová difrakční tenzometrie.....	[-]
b ₁	- deformace povlaku způsobena vnitřní napjatostí	[-]
b ₂	- deformace substrátu způsobena vnitřní napjatostí	[-]
d _{hkl}	- vzdálenost meziatomových rovin.....	[μm]
f	- krok posuvu přípravku	[mm]
hkl	- atomové roviny.....	[-]
l _o	- volná délka kobaltu	[μm]
n	- řád difrakce.....	[-]
α	- koeficient lineární roztažnosti	[°C]
α ₁	- koeficient délkové roztažnosti pro povlak	[K ⁻¹]
α ₂	- koeficient délkové roztažnosti pro substrát.....	[K ⁻¹]
α _s	- tepelná roztažnost substrátu	[K ⁻¹]
α _c	- tepelná roztažnost povlaku	[K ⁻¹]
ε _c	- Youngův modul pro povlak.....	[MPa]
σ	- směrodatná odchylka.....	[-]
σ ₁	- zbytkové napětí v povlaku.....	[MPa]
σ ₂	- zbytkové napětí v substrátu	[MPa]
λ	- vlnová délka rentgenového záření.....	[m]
2θ	- úhel mezi difraktovaným zářením a strukturními rovinami.....	[°]
χ	- úhel rotace vzorku kolem osy definované průnikem difrakční roviny a povrchu vzorku.....	[°]
ψ	- úhel natočení vyhodnocované roviny vůči normále povrchu	[°]

ν_c	- Poissonovo číslo	[-]
ν_1	- Poissonovo číslo materiálu povlaku	[-]
ν_2	- Poissonovo číslo materiálu substrátu	[-]
ω	- úhel mezi dopadajícím rentgenovým paprskem a povrchem vzorku	[°]
\bar{x}	- výběrový průměr	[-]
$\Delta\sigma_{th}$	- velikost tepelného zbytkového napětí	[MPa]
$\Delta\sigma$	- odchylka měření zbytkové napjatosti	[MPa]
ΔT	- změna teploty	[°C]

ÚVOD

Na trhu s řeznými nástroji působí celá řada výrobců, jejichž hlavním cílem je vyrábět vysoce kvalitní výrobky se snahou zvýšit produktivitu vyjádřenou vyššími řeznými parametry či větším objemem odebraného materiálu za jednotku času. Z tohoto důvodu je na výrobce neustále kladen tlak jak ze strany zákazníka, tak i z důvodu zachování si své konkurenceschopnosti na trhu, aby neustále zlepšovali a vyvíjeli nové řezné nástroje s hlavním cílem zvýšit jejich životnost. Jedním z efektivních způsobů jak zvýšit užité vlastnosti a výrazně prodloužit trvanlivost řezných nástrojů je depozice tenkých otěruvzdorných vrstev, které splňují požadavky pro konkrétní způsob použití. Dva z nejběžnějších postupů, které se aplikují a trvale podléhají neustálým inovacím, jsou procesy chemické depozice par (CVD) a fyzikální depozice (PVD). Avšak i přes tento veškerý pokrok ve výrobě povlakovaných řezných nástrojů stále dochází k jejich předčasnému opotřebení a selhání, což snižuje bezpečnost a kvalitu řezného procesu.

V současné době se pozornost vztahuje stále více ke stanovení zbytkových napětí, vznikajících během výrobního procesu řezného nástroje. Ta jsou charakterizována jako napětí, která v materiálu existují bez vnějšího působení sil a momentů vznikající jako důsledek mechanického a tepelného zatížení povrchu. Jejich přítomnost představuje hlavní problém v mnoha obráběcích aplikacích, protože nadměrné úrovně zbytkového napětí mohou výrazně ovlivnit výkon, spolehlivost a životnost řezného nástroje. Významnou roli mají zbytková napětí vzniklá v procesu depozice řezného nástroje, respektive jejich charakter. Obecně PVD povlaky vykazují napětí tlaková, která mají pozitivní vliv na životnost nástroje naopak u CVD povlaků se vytváří napětí tahová, která mají negativní dopad na jeho trvanlivost z důvodu iniciace a šíření trhlin v povlaku. Z tohoto důvodu se po povlakování zařazují do výrobního procesu technologie úprav nanesených povrchových vrstev, jejichž hlavním cílem je eliminovat tahová zbytková napětí a zvýšit tak životnost řezných nástrojů. Doposud však bylo publikováno poměrně málo informací o porovnání vlivu trvanlivosti řezného nástroje s CVD povlakem po různých povrchových úpravách v souvislosti se zbytkovým napětím. Důležité je rovněž zmínit, že životnost nástroje nelze hodnotit pouze z pohledu jednoho faktoru, kterým v tomto případě je zbytkové napětí. Vždy je potřeba zahrnout širší spektrum dalších parametrů, které umožní komplexní pohled na tuto problematiku.

Jedním z významných výrobců povlakovaných řezných nástrojů ze slinutého karbidu je společnost Dormer Pramet s. r. o, která se specializuje na komplexní výrobu řezných nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) pro různé obráběcí operace a díky níž mi bylo umožněno vypracování této diplomové práce.

CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Neustálé požadavky zákazníka na zvyšování trvanlivosti řezných nástrojů vyžadují výzkum a vývoj v této oblasti. Z tohoto důvodu tato diplomová práce pojednává o vlivu zbytkové napjatosti, v povrchových vrstvách VBD, deponovaných metodou CVD na jejich životnost.

U řezných nástrojů ze slinutého karbidu s CVD povlaky vzniká značný problém, zejména při jejich aplikaci pro přerušované řezy. V procesu povlakování se z důvodu vysoké depoziční teploty vytváří síť trhlin v povrchové vrstvě povlaku, vlivem výskytu tahových zbytkových napětí, způsobených značným rozdílem koeficientu teplotní roztažnosti mezi substrátem a jednotlivými složkami povlaku. Následně při aplikaci řezného nástroje se trhliny rozpínají a může dojít k jeho předčasnému selhání. Jedním z možných způsobů šíření trhliny při řezném procesu je náraz, ke kterému dochází při každém vstupu ostří nástroje do řezu nebo tepelné zatížení, kdy se ostří nástroje během úběru třísky prudce zahřeje a poté se při výstupu z řezu ochladí, a tím dojde k iniciaci trhlin.

Hlavním cílem této diplomové práce bude ve spolupráci s firmou Dormer Pramet s.r.o. výzkum v oblasti změn zbytkových napětí v povrchových vrstvách povlakovaných VBD ze slinutého karbidu po aplikaci povrchové úpravy, která má za cíl zvýšit tlaková napětí, která podporují stlačování trhlin v nástroji a výrazně tak zvyšují jeho životnost. Pro povrchovou úpravu po depozici byla zvolena technologie mokrého pískování, kdy bude zkoumán vliv této metody na změny zbytkového napětí v nástroji deponovaného metodou CVD. Na základě získaných výsledků bude hlavním předmětem zkoumání určit, které parametry procesu mokrého pískování mají vliv na opakovatelnost výrobního procesu a tím zajištění stabilní úrovně životnosti pro všechny vyráběné nástroje.

Dílní cíle diplomové práce:

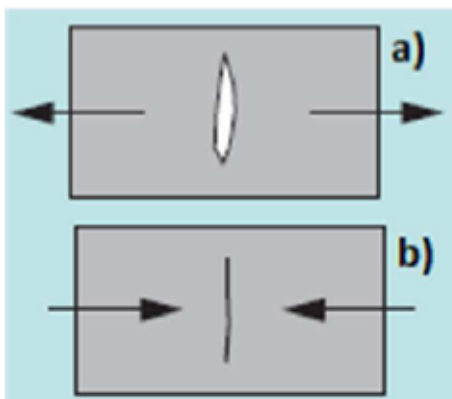
- Provést analýzu současného stavu dané problematiky.
- Provést experimentální testy mokrého pískování s předem stanovenými procesními parametry.
- Změřit velikost zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakční tenzometrie.
- Na základě provedených experimentů vyhodnotit parametry, které ovlivňují opakovatelnost a stabilitu výrobního procesu.
- Provést funkční zkoušku obrábění testovaných VBD.
- Provést analýzu všech dosažených výsledků a stanovit přínosy a případná doporučení pro výzkum a praxi.

1 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ A METODY MĚŘENÍ

Zbytková napětí jsou jednou z významných složek integrity povrchu a důležitým činitelem při ovlivňování užitných vlastností součástí. Především technologie výroby a úprava vstupního materiálu má vliv na vznik a velikost zbytkových napětí. Zbytkové napětí je tedy jedním z mnoha druhů, vznikajících v důsledku nehomogenní deformace a lze je obecně definovat jako vícesosé napětí, působící ve výrobku po velmi dlouhou dobu přesto, že všechny jeho části mají stejnou teplotu a na výrobek již nepůsobí žádné vnější síly. Výskyt zbytkových napětí je do jisté míry spojen s plastickou deformací. Jestliže dojde ke vzniku pružně plastického stavu v některém bodě tělesa, pak po odstranění příčiny vzniku napjatosti (deformační, silová či teplotní), zůstanou v tělese určitá zbytková (residuální) napětí. Z obecného hlediska však nemusí být zbytkové napětí nutně spojeno s plastickou deformací.^{1,2} Příčiny vzniku vnitřních napětí lze rozdělit do několika následujících skupin:¹

- a) Mechanické - nehomogenní plastická deformace při mechanickém zpracování materiálu.
- b) Chemické a strukturní - změny objemu materiálu vlivem chemických reakcí, rozdílných fyzikálních vlastností jednotlivých fází.
- c) Vícevrstvé struktury - rozdílné fyzikální vlastnosti jednotlivých vrstev.
- d) Nové technologie - nerovnovážné podmínky procesu ve speciálních technologiích vytváření a modifikace materiálů.
- e) Konstrukční celky - nepřesnosti jednotlivých součástí spojených v konstrukčních celcích.

Vnitřní napětí je v materiálu snižováno plastickou deformací. Čím má materiál větší mez pružnosti, tím je napětí větší. Při vzrůstající tvrdosti, která navíc ovlivňuje nárůst křehkosti, vzrůstá neúměrně i vnitřní napětí v souvislosti s různými procesy, které by odezněly plastickou deformací. Obecně se uvažuje, že tlaková zbytková napětí jsou výhodná, jelikož zlepšují únavové charakteristiky materiálu a omezují vznik a šíření trhlin, které se vlivem tlaku uzavírají. Naopak tahová zbytková napětí mají negativní vliv na životnost součástí, ve které podporují vznik a rozvoj trhlin. Při vysokých hodnotách vnitřních napětí ovšem může docházet k nežádoucím deformacím vlivem jejich uvolňování a degradací mechanických vlastností jak v případě tahových tak i tlakových napětí. Při prvotním uvolnění napětí se trhliny šíří nejkratší cestou až po částečném vyčerpání dochází k tomu, že jde cestou nejmenšího odporu, tj. sleduje více strukturní slabost materiálu. Z tohoto hlediska je nutné správné pochopení a kontrola zbytkových napětí, které vedou k lepší funkci a životnosti dané součásti.^{1, 2, 3}

Obrázek 1.1 - Vliv zbytkových napětí na vývoj trhlin⁴

a) Tahová napětí - iniciace trhliny b) Tlaková napětí - eliminace trhliny

1.1 Rozdělení zbytkových napětí

V současné době se pro rozdělení zbytkových napětí obvykle užívá klasifikační kritérium velikost objemů, kdy napětí zůstávají neměnná co do velikosti i do směru, respektive jsou homogenní. V technické praxi se pod pojmem zbytkové napětí rozumí vždy zbytkové napětí I. druhu. Někdy se rovněž zbytková napětí označují jako technologická napětí, neboť vznikají v důsledku působení technologických procesů při výrobě strojních součástí.^{1,3}

1. Zbytková napětí I. druhu

- jedná se o zbytková napětí, která jsou přibližně homogenní a zasahují celý objem součástky, či její podstatnou část, takže vždy dochází ke změnám jeho makroskopických objemů. K těmto napětím patří i napětí v nekonečně tenké, ale rozsáhlé oblasti. Porušením kompaktnosti součásti (např. jejím rozdělením) dojde ke změně její makrogeometrie.^{2,3}

2. Zbytková napětí II. druhu

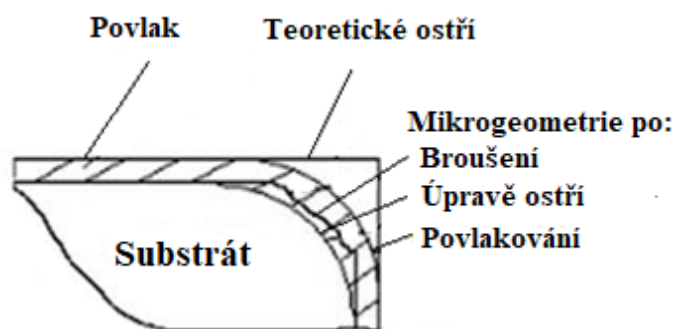
- zasahují objem několika krystalových zrn. Tato napětí jsou podmíněna anizotropií zrna a v polykrystalických kovech jsou homogenní v oblasti několika jednotlivých zrn. Porušením kompaktnosti součásti (např. jejím rozdělením) nemusí dojít ke změně její makrogeometrie.^{2,3}

3. Zbytková napětí III. druhu

- projevují se v objemu několika atomových vzdáleností a dosahují rovnováhy jen v dostatečně velké části zrna. Porušením kompaktnosti součásti nedochází ke změně její makrogeometrie. Zbytkové napětí v určitém bodě je vždy superpozicí všech tří druhů.^{2,3}

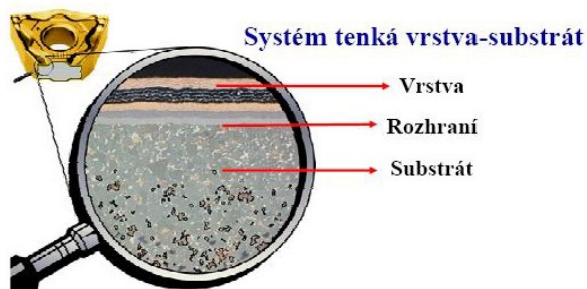
1.2 Vliv zbytkové napjatosti na trvanlivost řezného nástroje ze slinutého karbidu

Zbytková napětí představují rozhodující faktor pro životnost řezných nástrojů a jsou součástí integrity povrchu, přičemž každá technologická operace má za následek jejich změnu či vznik. Mezi důležité vlivy při procesu obrábění patří vlastnosti integrity povrchu břitu, geometrie obráběcího nástroje, povlak a technologické úpravy povrchu břitu. Tyto vlivy při vhodně navržených parametrech prodlužují trvanlivost řezného nástroje a působí pozitivně na výkon v procesu řezání. Z tohoto hlediska je nutné správné pochopení a kontrola zbytkových napětí, které vedou k lepšímu výkonu řezných nástrojů.^{3, 5}



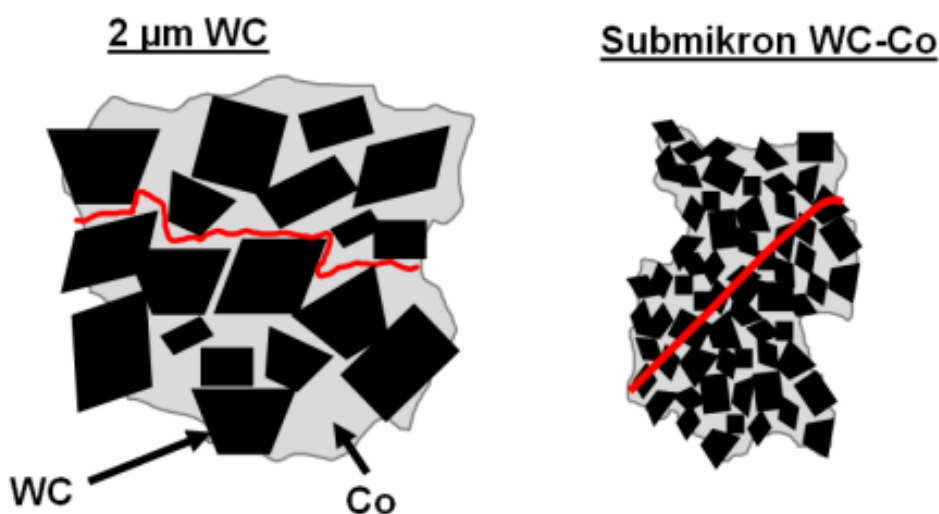
Obrázek 1.2 - Schéma povlakovaného řezného nástroje⁶

Vzhledem k střídavému mechanickému a vysokému tepelnému zatížení řezných nástrojů je snaha vnést do řezného nástroje tlaková zbytková napětí, která jsou výhodná z hlediska prodloužení jeho životnosti. Proto musí být během jejich výroby zajištěno, že mají dostatečné tlakové zbytkové napětí ve své povrchové vrstvě. V této souvislosti je potřeba vzít v úvahu některé specifické vlastnosti nástrojů ze slinutého karbidu. Substrát se skládá nejméně z dvoufázového materiálu, a to jednoho nebo více tvrdých materiálů (karbid) a pojiva (kobalt). Pro prodloužení životnosti nástroje je vyžadováno vysoké napětí v tlaku, přičemž existuje horní mez tlakového napětí, od které se opět snižuje životnost nástroje. Pro zabránění poškození nástroje je však také potřebné vysoké tlakové napětí v podpovrchové vrstvě substrátu, což je realizovatelné pouze v určitých mezích, protože povlak a zbytková napětí substrátu se vzájemně ovlivňují. V tomto ohledu je obzvláště důležité najít kompromis, který kombinuje dlouhou životnost s minimalizovaným rizikem poškození řezného nástroje.⁵



Obrázek 1.3 - Systém tenká vrstva – substrát⁷

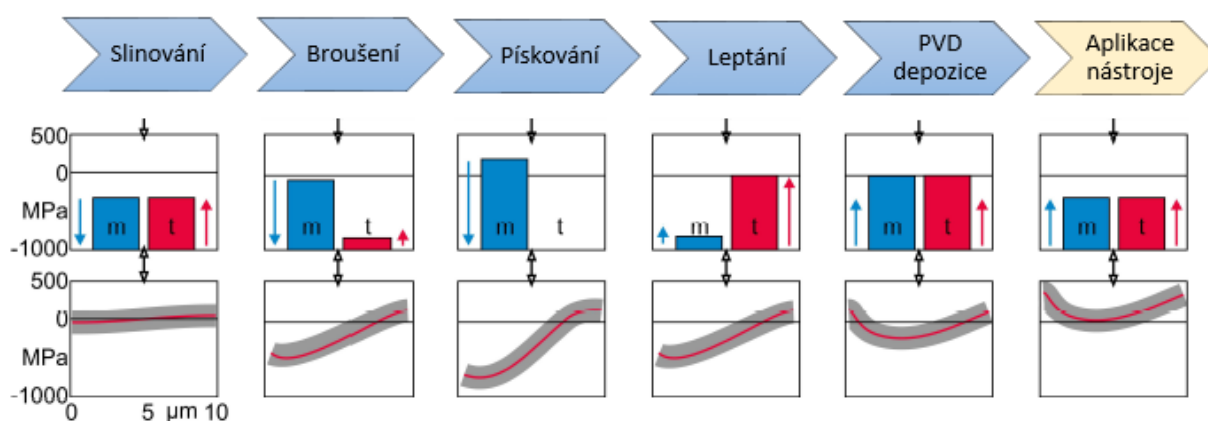
Například v porovnání s rychlořeznou ocelí je slinutý karbid podstatně tvrdší, má vyšší pevnost v tlaku, ale zároveň je citlivý na namáhání tahem. Z tohoto důvodu je snaha vnést do základního materiálu při výrobě tlaková napětí, aby se zvýšila odolnost proti vzniku trhlin, způsobených tahovým namáháním v průběhu obráběcího procesu. Jeden z faktorů, který do značné míry ovlivňuje zbytková napětí a jejich rozložení, je mikrostruktura substrátu a s tím souvisí i volná délka kobaltu l_0 . Jak uvádí obrázek 1.4, se zmenšujícím se obsahem kobaltu dochází ke zvyšování vzdálenosti mezi zrny karbidu wolframu, což může být zdrojem mikrotrhlin. S vysokým obsahem kobaltu narůstá plastická schopnost, přičemž se materiál deformuje a zpevňuje a dochází k zastavení šíření trhliny.⁵



Obrázek 1.4 - Mechanismus šíření trhliny v souvislosti s velikostí karbidických zrn⁵

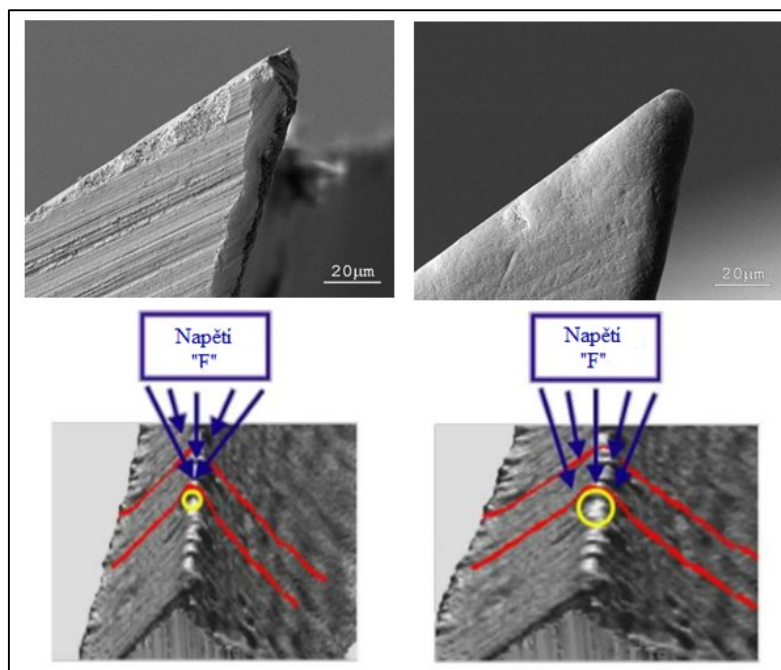
1.2.1 Vývoj zbytkové napjatosti ve výrobním procesu VBD

Konečný stav zbytkového napětí vyrobeného nástroje je výsledkem řady kroků, kde každý z nich ovlivňuje existující stav zbytkového napětí nebo jej dokonce znovu vytváří. Vliv tepelného a mechanického zatížení během procesních kroků při výrobě nástroje je zodpovědný za konečný stav zbytkového napětí nástroje. Mechanické zatížení zpravidla způsobuje tlakové napětí, zatímco tepelné zatížení způsobuje napětí tahová. Ve zvláštních případech mohou také mechanické účinky vést k posunutí úrovně zbytkového napětí ve směru k tahovému napětí. Ve většině případů dochází k vzájemnému prolínání těchto mechanismů a výsledné zbytkové napětí je pak dáno jejich superpozicí. Na obrázku 1.5 je zobrazen postupný proces výroby řezného nástroje a vliv dané operace na vývoj zbytkového napětí v substrátu, přičemž modrý sloupec vyznačuje velikost mechanického účinku a červený sloupec velikost účinku tepelného. Křivka v grafech pak charakterizuje vývoj zbytkového napětí směrem do hloubky 10 μm.^{8,9}



Obrázek 1.5 - Vliv mechanického a tepelného účinku v průběhu výrobního procesu řezného nástroje ze slinutého karbidu ⁸

V procesu slinování dochází k vývoji značného tepelného a mechanického zatížení řezného nástroje. Avšak jak lze vidět z grafu na obrázku 1.5, oba účinky se vzájemně eliminují a v nástroji existuje téměř zanedbatelné zbytkové napětí. Oproti tomu při operaci broušení, kde se rovněž vyskytuje mechanické a tepelné zatížení se již objevují určité hodnoty zbytkových napětí. Při broušení mechanický účinek převyšuje teplotní vzhledem k tomu, že teplotní je potlačen procesní kapalinou a dochází tak k tlakové zbytkové napjatosti. Vzhledem k tomu, že po aplikaci broušení se na břitu nástroje vyskytují různé defekty a povrchové vady, zařazuje se do výrobního procesu operace na úpravu ostří. V oblasti ostří dochází k superpozici zbytkových napětí, která působí v povlaku. Jak lze vidět na obrázku 1.6, tak v případě břitu s výskytem různých defektů dochází ke koncentraci zbytkových napětí zejména v okolí ostří, která mohou vést k nenávratnému poškození řezného nástroje. Proto je nutné po broušení do výrobního procesu zařadit technologii pro úpravu mikrogeometrie, aby ostří nástroje bylo zaobleno v řádech několika mikrometrů. Hlavním důvodem je, že u ostrého břitu dochází k soustředění sil na menší plochu a po úpravě břitu nástroje se plocha zvětší a dojde k rozprostření sil a ke snížení napětí. Místa s defekty jsou rovněž náchylná k porušení naneseného povlaku. Operace pískování, tedy eliminuje defekty na ostří a podporuje rozložení napětí na břitu nástroje, přičemž převládá mechanický účinek a tlaková napjatost zde dosahuje svého maxima. Poslední operací před depozicí nástroje je leptání, kde dominuje tepelný účinek ($T > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) a tím se úroveň napětí posouvá do tahového směru. Zbytková napětí po leptání odpovídají přibližně stejným napětím jak u broušení. Během PVD depozice lze pozorovat tepelný účinek, který vede k posunu směrem k tahovým napětím. Při aplikaci řezného nástroje dochází k dalšímu zatížení, což může vést k dalšímu posunu napětí do tahového směru. Na nástroj působí mechanické a tepelné zatížení a může dojít k lokálnímu překročení kritických hodnot napětí v tahu, které je podporováno výskytem mikrotrhlin a vede k následnému poškození nástroje. ^{8,9}

Obrázek 1.6 - Vliv úpravy ostří na zbytkovou napjatost ¹⁰

1.3 Zbytková napjatost v deponovaných vrstvách

Povlaky řezných nástrojů jsou zatíženy relativně vysokým vnitřním zbytkovým napětím a projevují se i ve struktuře povlakovaného nástroje a významně tak ovlivňují jeho výkonnost. Povlaky se nanášejí na původní povrch materiálu a obvykle mají odlišné chemické složení i strukturu než základní materiál. Dochází ke vzniku rozhraní s výraznou změnou fyzikálně-mechanických i chemických vlastností, což může způsobit problémy jak při vytváření povlaků, tak i při jejich aplikaci. Nastává superpozice pole napětí způsobeného zatěžováním součásti nebo nástroje při provozu a zbytkových pnutí v oblasti rozhraní povlaku a podkladu. Tlaková napětí jsou považována za výhodná, protože působí proti iniciaci a šíření trhlin v povlaku a jsou spojena s delší životností povlakovaného nástroje, pokud není překročeno určité maximální napětí, které zhoršuje křehkost povlaku a tím i řezný výkon. ¹¹

V povlacích mohou vznikat následující zdroje zbytkového napětí: ¹²

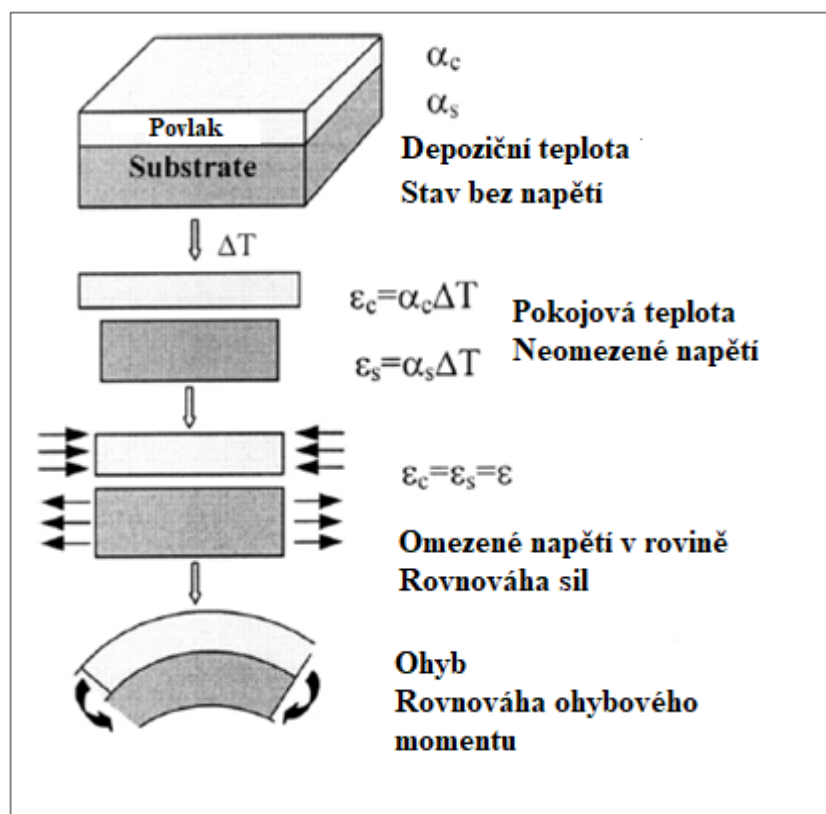
1. Tepelné zbytkové napětí způsobené v důsledku nesouladu koeficientu tepelné roztažnosti mezi povlakem a substrátem.
2. Vnitřní zbytková napětí vyplývající z růstu povlaku způsobené chemickými reakcemi, fázovými transformacemi, bombardováním energetickými částicemi apod.
3. Vnější napětí způsobená deformací.

Jak již bylo uvedeno, tepelná zbytková napětí jsou výsledkem rozdílu koeficientů tepelné roztažnosti mezi povlakem a substrátem a značnými teplotními odchylkami mezi teplotou depozice a provozní teplotou povlakovaného nástroje. Pro odhad velikosti

tepelného zbytkového napětí $\Delta\sigma_{th}$ pro případy, kdy je povlak mnohem tenčí než substrát, lze použít následující vztah: ¹³

$$\Delta\sigma_{th} = \frac{\Delta T \cdot (\alpha_s - \alpha_c) \cdot E_c}{1 - \nu_c} \quad (1.1)$$

kde ΔT je změna teploty, α_s a α_c jsou tepelné roztažnosti substrátu a povlaku, E_c je Youngův modul pro povlak a ν_c je Poissonův poměr povlaku. Napětí se přenáší mezi povlakem a substrátem stříhem po jejich rozhraní, což způsobuje, že se povlakované systémy stahují, protahují nebo ohýbají tak, jak je uvedeno na obrázku 1.8. Podstatného snížení tepelného napětí lze dosáhnout snížením tepelné difuzivity, snížením modulu pružnosti povrchové vrstvy nebo vytvořením tloušťky vrstvy tak, že rozhraní je mimo hloubku maximálního teplotního gradientu. ¹³



Obrázek 1.7 - Model zbytkového napjatosti v deponovaném nástroji ¹²

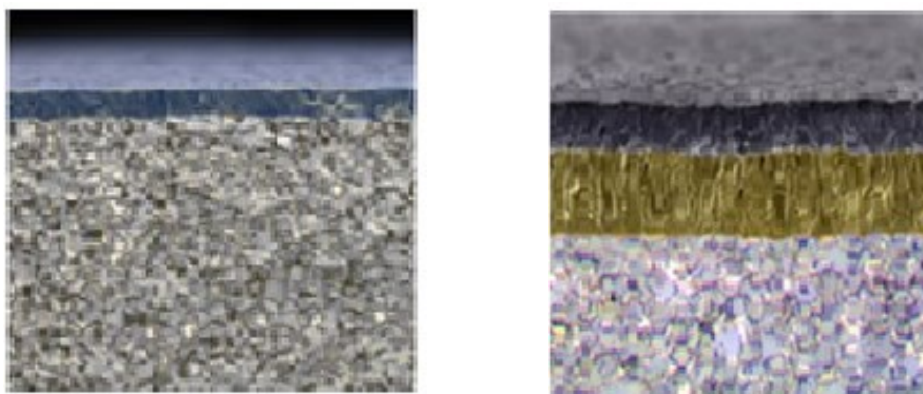
Vnitřní zbytková napětí pocházejí ze způsobu růstu povlaku. U povlaků nanesených ve vakuu jsou vnitřní napětí typickým důsledkem akumulovaných krystalografických defektů, které jsou zabudovány do povlaku během nanášení, například bombardováním ionty. Vnitřní napětí v povlacích nanesených ve vakuu souvisí s mikrostrukturou, a proto jsou velmi citlivé na podmínky depozice. Kromě podmínek nanášení je úroveň zbytkového napětí také závislá na tloušťce povlaku, kdy se vzrůstající hodnotou tloušťky povlaku je pozorován i pokles úrovně tlakového napětí. ¹³ Tyto účinky byly přezkoumány například Kammingem a kol. ¹⁴, kdy bylo potvrzeno, že růstové napětí v povlaku závisí na jeho

tloušťce, zatímco tepelné napětí je stejné pro všechny vrstvy na daném substrátu. Existuje značná rozmanitost naměřených hodnot zbytkového napětí pro stejnou kombinaci povlaku a substrátu. To je způsobeno rozdíly v používaných depozičních procesech, technikách měření napětí, tloušťce povlaku, struktuře, složení apod.^{12, 13}

Vytvoření vysoce kvalitního povlaku zahrnuje mnoho složitých výrobních kroků, přičemž těmi hlavními jsou odčerpání vzduchu, ohřev, leptání (iontové), povlakování a ochlazování. Zásadní význam z hlediska výsledné výkonnosti nástroje mají parametry výrobního procesu, jako je např. teplota, průtok plynu nebo tlak.¹⁵ Požadavky na povlakování se liší v závislosti na aplikaci použití. Zatímco povlak pro frézování musí být houževnatý, tak povlak nástrojů pro soustružení musí být naopak odolnější proti opotřebení. Pozornost při povlakování nástrojů je nejvíce zaměřena na 3 základní oblasti:¹⁶

- Volbu vhodného povlaku.
- Tvorbu povlaku během procesu povlakování.
- Strukturu jednotlivých vrstev, nebo multi vrstvy.

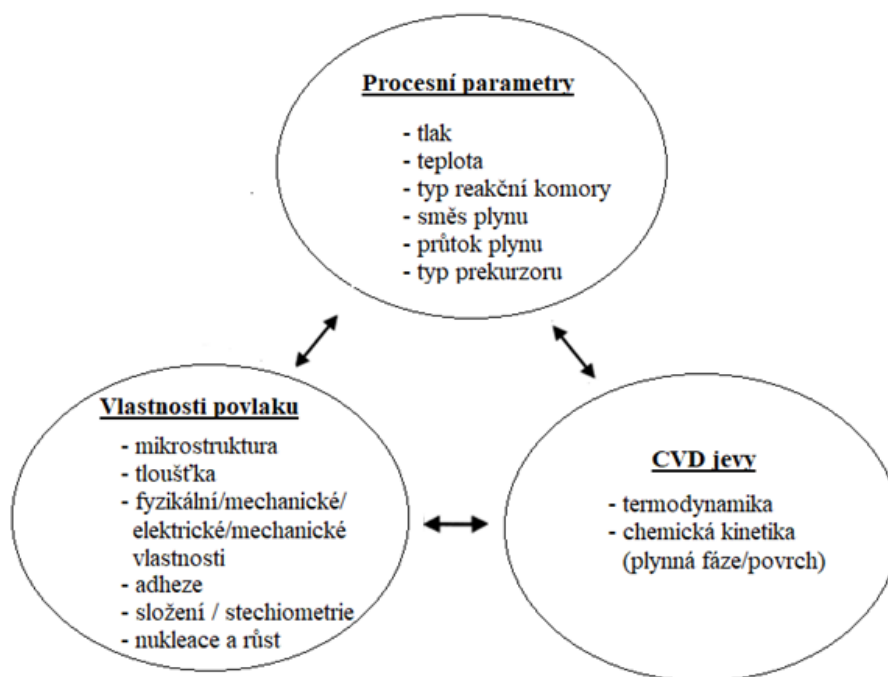
Nejdůležitější metody povlakování rezných nástrojů jsou CVD (chemická depozice par) a PVD (fyzikální depozice), které mají své charakteristické výhody i nevýhody a jsou předmětem neustálého výzkumu a vývoje. Zejména optimalizace parametrů základního kovu, povrchové úpravy a depozičních parametrů je nezbytná pro získání deponované vrstvy s dobrou adhezí a vysokou životností.¹⁷ V případě CVD povlakování, které probíhá za vyšších teplot než PVD depozice je do povlaku vneseno tahové napětí vlivem rozdílu tepelné roztažnosti mezi povlakem a substrátem, které vyvolá iniciaci trhlin. U povlaků nanášené metodou PVD se vyskytuje tlakové napětí vzniklé především iontovým bombardováním, ke kterému dochází v samotném procesu.



Obrázek 1.8 - Struktura PVD povlaku (vlevo) a CVD povlaku (vpravo)¹⁸

1.3.1 Chemická depozice z plynné fáze (CVD)

Tvrdé povlaky nanášené na slinuté karbidy chemickou depozicí par (CVD) se široce používají v obráběcích aplikacích kvůli jejich vysoké odolnosti proti opotřebení a příznivým vlastnostem při vysokých teplotách. Jedná se o chemický proces aktivovaný teplem za použití plynné reakční komory, do které se zavádějí chemické sloučeniny s cílem vytvořit tenký povlak na substrátu kondenzací. Základním požadavkem přitom je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní ale přitom prchavou sloučeninu, která se v důsledku přivedení energie (ohřevem, laserem, plazmovým obloukem) chemicky rozkládá za přítomnosti nekovového reaktivního plynu (např. N_2 , NH_4 , CH_4). Produkty rozkladu jsou pak dále ukládány na ohřátý povrch deponovaného nástroje. Tloušťka CVD povlaků řezných nástrojů se v současné době pohybuje v rozmezí 5 - 20 μm , přičemž s vyšší tloušťkou roste kromě vysoké odolnosti proti opotřebení i riziko snadnějšího odlupování povlaku. Mezi CVD povlaky se řadí karbonitrid titanu (TiCN), oxid hlinitý (Al_2O_3) a nitrid titanu (TiN) v různých kombinacích. V současné době existuje několik typů CVD metod, které se od sebe liší nastavením pracovních podmínek a způsobem vybuzení chemických reakcí. ^{19, 20, 21}



Obrázek 1.9 - Vztah mezi procesními parametry, vlastnostmi povlaku a jevy při CVD depozici ²⁰

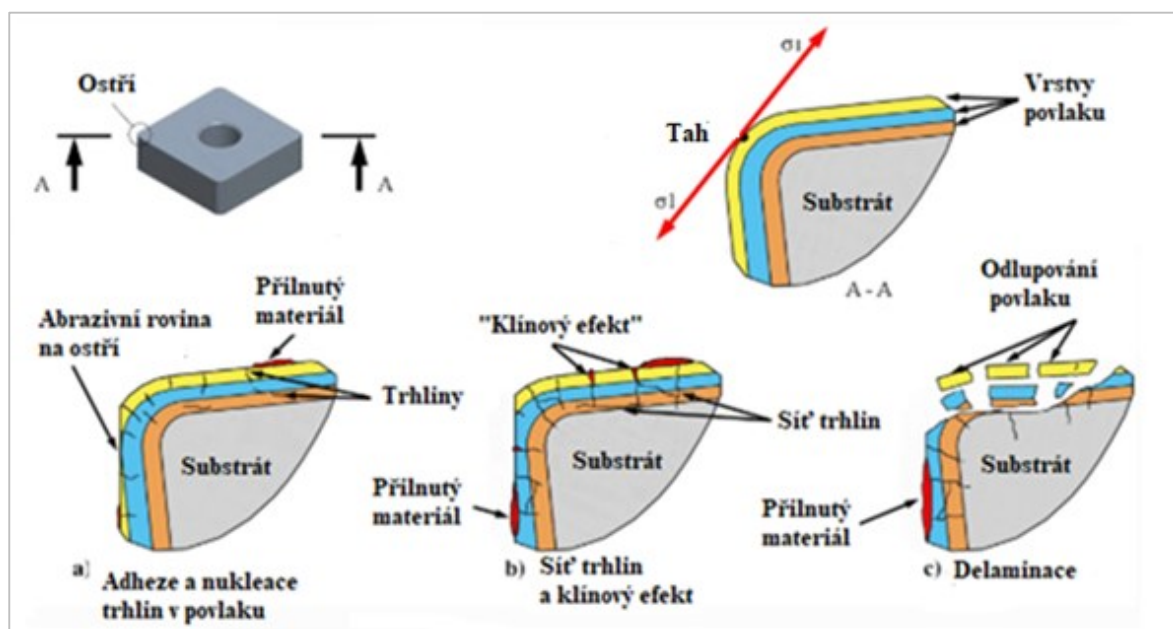
Významným faktorem, který ovlivňuje vlastnosti povlaku v průběhu ochlazovací fáze depozičního procesu, jsou zbytková napětí vytvářená v jednotlivých vrstvách povlaku. Proto jedna z hlavních nevýhod CVD metody je vysoká depoziční teplota, která je aplikována z důvodu vytvoření větší tloušťky a rovnoměrnosti povlaku, a tím i jeho odolnosti oproti opotřebení. Výše teploty se pohybuje v rozmezí 800 - 1050°C a má za následek vývoj tahového zbytkového napětí vlivem kolísání koeficientů tepelné roztažnosti mezi substrátem

a deponovanou vrstvou, jak již bylo vysvětleno v kapitole 1.3. Tabulka 1 ukazuje koeficienty teplotní roztažnosti WC, TiC, TiCN. Během CVD procesu se povlak TiC (nebo TiN, TiCN) nanáší na slinutý karbid při teplotě 1050°C a po ochlazení se teplota změní na teplotu okolí (zhruba 25°C) a tím dojde k výskytu zbytkové napjatosti.^{13, 19}

Tabulka 1 - Materiálové vlastnosti WC, TiC, TiN¹⁹

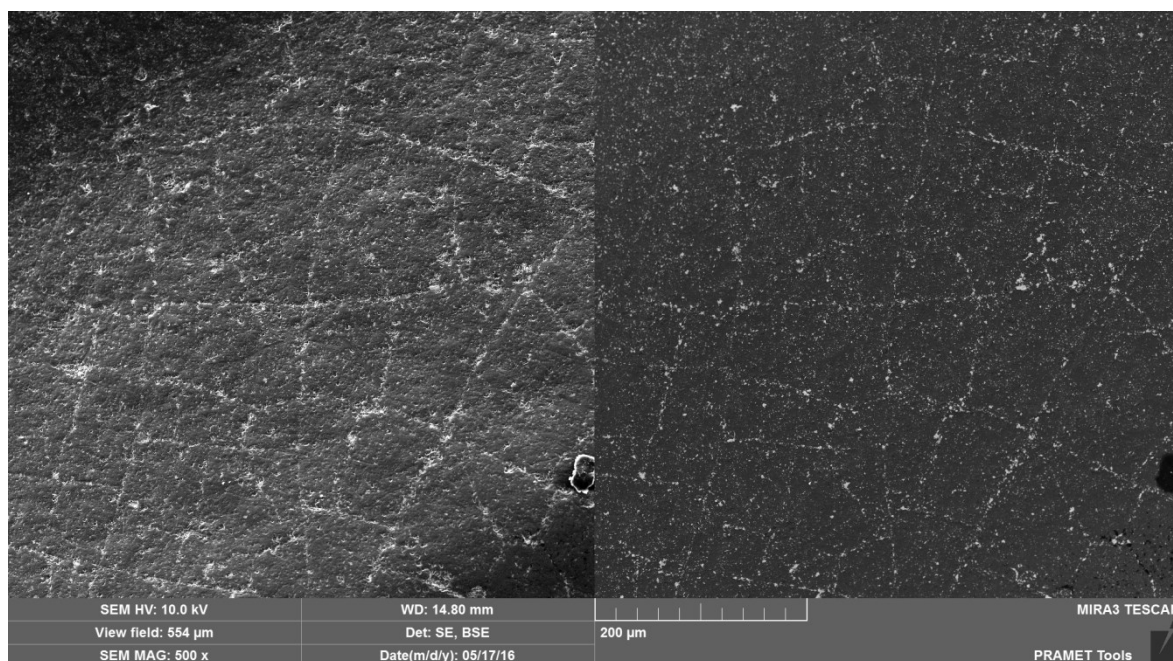
Vlastnosti WC, TiC a TiN			
Vlastnosti	Materiál		
	WC	TiC	TiN
Tvrdost (HV)	1780	3200	2100
Modul pružnosti (kg/mm ²)	72 000	32 100	61,600
Koeficient lineární roztažnosti α (10 ⁻⁶ / °C)	5,4	7,74	9,35
Pevnost v tahu (kg/mm ²)	35	28	-
Poissonovy poměry	0,22	0,2	0,2

V důsledku toho se během ochlazování v povlaku vytváří síť trhlin, která negativně ovlivňuje životnost nástroje tím, že snižuje mechanickou stabilitu povlaku a rovněž podporuje difúzní opotřebení a oxidaci. Trhlina iniciující se v povlaku nástroje se šíří až do substrátu, kde následně způsobuje selhání nástroje, tak jak je uvedeno na obrázku 1.10. Aby se snížilo zbytkové napětí v tahu na povrchu, měl by být koeficient teplotní roztažnosti substrátu blízký koeficientu povlaku a rovněž povlakovací teplota by měla být co nejnižší.¹⁹



Obrázek 1.10 - Průběh tvorby trhlin v CVD povlaku vlivem působení zbytkových napětí²²

Pokud se trhlinka v povlaku dostane až na povrch, může materiál obrobku proniknout do trhliny, což podporuje tzv. klínový efekt, jak lze vidět na obrázku 1.10, a který přispívá k dalšímu šíření trhliny a jejímu spojování se sousedními trhlinami, které spolu vytvářejí síť trhlín.¹⁷ Hodnoty zbytkových napětí řezných nástrojů povlakovaných metodou CVD se pohybují obvykle v rozmezí 0,5 GPa v tahu a 0,1 - 2 GPa v tlaku.¹⁰ Z důvodu výskytu tahových napětí nastává značný problém během aplikace řezného nástroje zejména u přerušovaného řezu. To je jeden z hlavních důvodů proč při frézování, kdy je břit nástroje vystaven rázům, tak se u silných povlaků nanášených CVD depozicí vyskytuje mikrovýdrolování, a proto jsou pro tento účel vhodnější zejména nástroje s PVD povlaky. Ohybová pevnost slinutých karbidů povlakovaných metodou CVD s rostoucí tloušťkou vrstvy klesá, kdežto u SK povlakovaných metodou PVD se příliš nemění.^{13, 19}



Obrázek 1.11 - Sít' trhlín na CVD povlaku vlivem tahové zbytkové napjatosti

Layning a kol.¹³ se zabývali selháním řezných nástrojů deponovaných metodou CVD v souvislosti s výskytem zbytkového napětí a vytvořili zjednodušený geometrický model soustavy substrát - povlak uvedený na obrázku 1.12. Předpokládá se, že povlak je homogenní a izotropní a v důsledku mikrometrové tloušťky povlaku v něm působí rovinná napjatost. Depozice probíhá při teplotě T_1 a při ochlazení dojde k poklesu na teplotu T_2 , tím dojde ke smrštění povlaku o hodnotu α_1 a substrátu o hodnotu α_2 podle následujících vztahů¹⁹

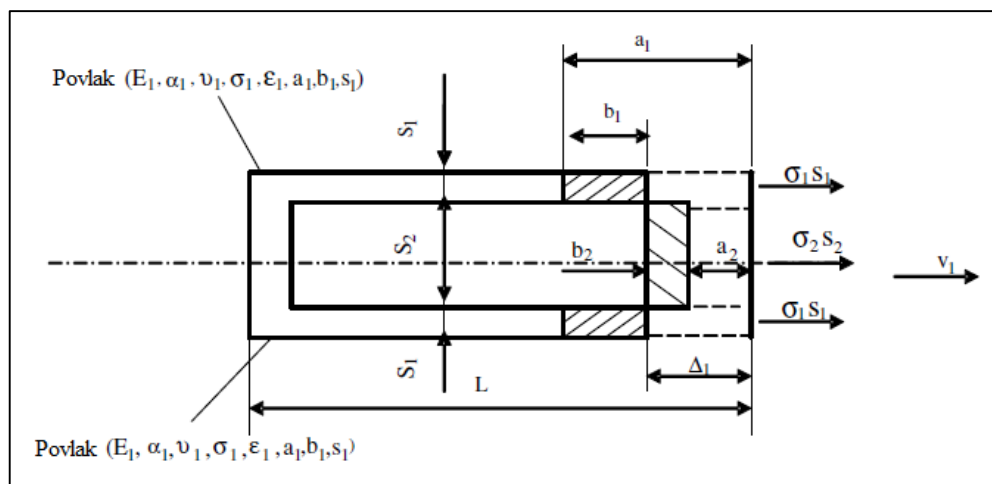
$$\alpha_1 = \alpha_1 \cdot L \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.2a)$$

$$\alpha_2 = \alpha_2 \cdot L \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.2b)$$

kde: L je délka soustavy povlak - substrát při teplotě T_1

α_1 je koeficient délkové roztažnosti pro povlak

α_2 je koeficient délkové roztažnosti pro substrát

Obrázek 1.12 - Zjednodušený model povlak – substrát ¹⁹

Vzhledem k tomu že povlak a substrát jsou pevně spojeny v jeden celek, tak dojde po ochlazení k deformaci celé soustavy o hodnotu ΔL , kterou lze dle obrázku 1.12 určit pomocí vztahu

$$(a_1 - b_1) = (\alpha_2 + b_2), \quad (1.3)$$

kde: b_1 je deformace povlaku způsobená vnitřní napjatostí

b_2 je deformace substrátu způsobená vnitřní napjatostí

Dále můžeme určit velikost deformace v důsledku vnitřních napětí v povlaku a substrátu dle vztahů

$$b_1 = \frac{(1 - \nu_1) \cdot L}{E_1} \cdot \sigma_1, \quad (1.4a)$$

$$b_2 = \frac{(1 - \nu_2) \cdot L}{E_2} \cdot \sigma_2, \quad (1.4b)$$

kde: ν_1 je Poissonovo číslo materiálu povlaku

ν_2 je Poissonovo číslo materiálu substrátu

E_1 je modul pružnosti v tahu pro povlak

E_2 je modul pružnosti v tahu pro substrát

σ_1 je zbytkové napětí v povlaku

σ_2 je zbytkové napětí v substrátu

Po dosazení vztahů (1.2) a (1.3) do vztahu (1,4) a následné úpravě platí

$$\frac{(1 - \nu_1)}{E_1} \cdot \sigma_1 + \frac{(1 - \nu_2)}{E_2} \cdot \sigma_2 = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.5)$$

Vzhledem k tomu, že nedochází k žádnému působení vnějších sil, musí mít celková síla, která roztahuje jednu složku, stejnou velikost jako síla, která stlačuje druhou složku, takže platí vztah:

$$2 \cdot \sigma_1 \cdot S_1 + \sigma_2 \cdot S_2 = 0, \quad (1.6)$$

kde: S_1 je plocha příčného průřezu povlaku

S_2 je plocha příčného průřezu substrátu

Z tohoto vztahu dále vyplývá:

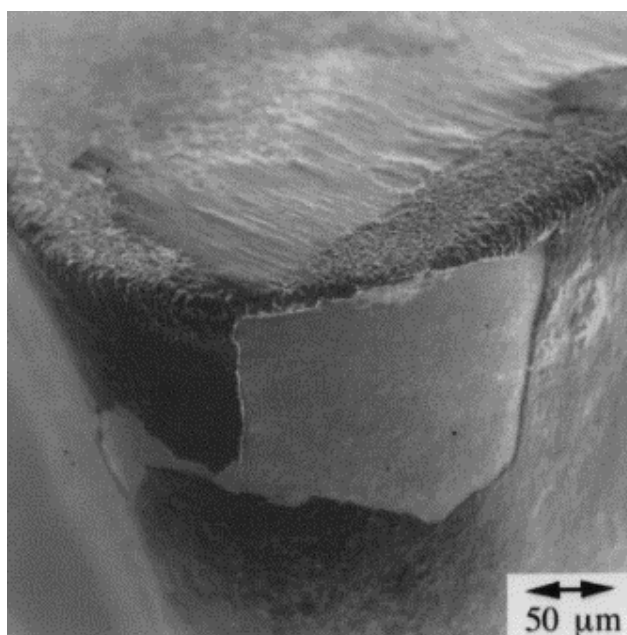
$$\sigma_2 = -\frac{2S_1}{S_2} \cdot \sigma_1$$

Protože $S_1 \ll S_2$, hodnota σ_2 se blíží nule a zbytkové napětí ve vrstvě povlaku pak lze určit ze vztahu

$$\sigma_1 = \frac{E_1 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_1 - T_2)}{1 - \nu_1} \quad (1.7)$$

Ze vztahu (1.7) lze určit, že ve vrstvě povlaku se vyskytují tahová zbytková napětí, přičemž jeho velikost závisí na modulu pružnosti povlaku, koeficientu délkové roztažnosti materiálu, substrátu a na velikosti změny teploty.

Experimentální výsledky ukazují, že selhání karbidových nástrojů povlakovaných metodou CVD je zapříčiněno dvěma způsoby a to delaminací povlak – substrát a vznik trhlin. Obecně k delaminaci dochází při kontinuálním řezném procesu a naopak při přerušovaném řezu se iniciují trhliny vlivem tahových zbytkových napětí. Dále bylo potvrzeno, že tloušťka povlaku nemá žádný vliv na zbytkové napětí vyvolané v průběhu povlakování.¹⁹

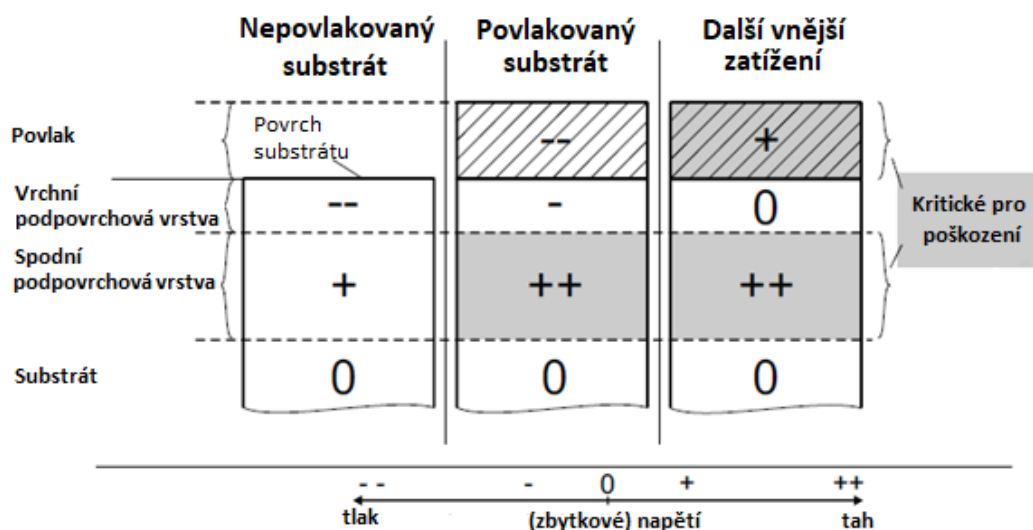


Obrázek 1.13 – Delaminace povlaku vlivem kritické velikosti zbytkových napětí a vysokého vnějšího zatížení²²

1.3.2 Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD)

U metody fyzikální depozice vrstev (PVD) jsou povlaky nanášeny za sníženého tlaku (0,1 – 1,0 Pa) kondenzací částic, které jsou uvolňovány ze zdroje částic (targetů) fyzikálními metodami - odpařováním (indukčně, laserem, nízkonapětovým obloukem nebo elektronovým paprskem) nebo rozprašováním (urychlenými ionty Ar utvářenými ve zkříženém magnetickém poli). Takto uvolněné částice jsou dále ionizovány, reagují s atmosférou komory, která je tvořena inertním a reaktivním plynem (např. N_2 , Ar) a záporným předpětím jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde se následně usazují ve formě tenkého povlaku. Oproti CVD metodě je pro vytvoření povlaku potřeba relativně nízkých teplot a to pod 500°C , kdy jsou vytvářeny povlaky o tloušťce 1 – 5 μm . Mezi typické povlaky patří nitridy, karbonitridy, oxidy a oxinitridy.²¹

Během PVD depozice dochází ke vzniku tlakových zbytkových napětí, která jsou obecně výhodná z hlediska celistvosti vrstvy, neboť uzavírají trhliny, které se v povlaku vytváří. Tlaková napětí zvyšují odolnost břitů včetně odolnosti proti trhlínám na břitu než je tomu u CVD povlaků, proto se obvykle používají k tvorbě odolných ostrých břitů. Velikost tlakových zbytkových napětí se pohybuje v rozmezí 0,1 - 4 GPa, ale může v některých případech dosahovat hodnot až 10 GPa, zatímco v substrátu se zbytkové napětí pohybuje okolo 400 MPa. Během aplikace řezného nástroje pak může dojít k vývoji kritické zóny, kde nastává poškození nástroje z důvodu výskytu vysokých tahových napětí.

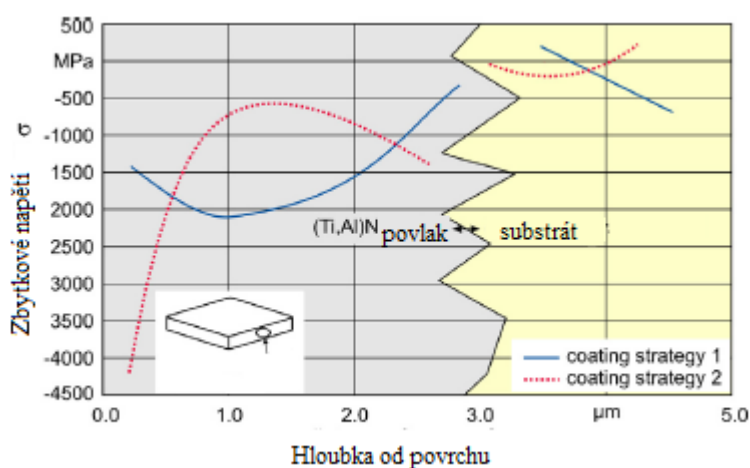


Obrázek 1.14 - Model vlivu zbytkového napětí na poškození povlakovaného nástroje¹⁷

Povlaky PVD jsou obvykle charakterizovány vysokým tlakovým zbytkovým napětím ve své struktuře v důsledku termoelastických účinků a poruch, které vznikají vlivem částic (atomy a ionty) s vysokou kinetickou energií během ukládání povlaku. Proto jsou silně závislé na procesních parametrech, zejména na energii bombardování ionty. Skordaris a kol.²³ uvedli, že velikost napětí při PVD povlakování závisí zejména na předpětí během

depozičního procesu. Svým experimentem potvrdili, že vyšší předpětí substrátu má za následek vývoj vyšších hodnot zbytkových napětí povlaku v důsledku zvýšené pohyblivosti atomů ve vakuové komoře během nanášení povlaku a jejich začlenění do struktury.

Rozložením zbytkových napětí v PVD povlaku pro vrstvu (Ti, Al)N se zabýval Danken a kol. ⁸ Z grafu na obrázku 1.15 lze pozorovat, že maximální tlaková zbytková napětí se vyskytují v povlaku a směrem k rozhraní dochází k jejich poklesu. Dále lze pozorovat, že v zóně substrátu dochází k přechodu zbytkových tlakových napětí na napětí tahová, což lze považovat za kritickou zónu, jelikož zde nastává porušení. Existence povlaku se silným zbytkovým tlakovým napětím vede k posunutí úrovně napětí substrátu do směru tahového napětí. Zde jsou za to zodpovědné kromě tepelných účinků i účinky mechanické. Z mechanických důvodů dochází ke kompenzaci vysokého tlaku při povrchovém namáhání v podpovrchové vrstvě substrátu, což vede k posunutí.

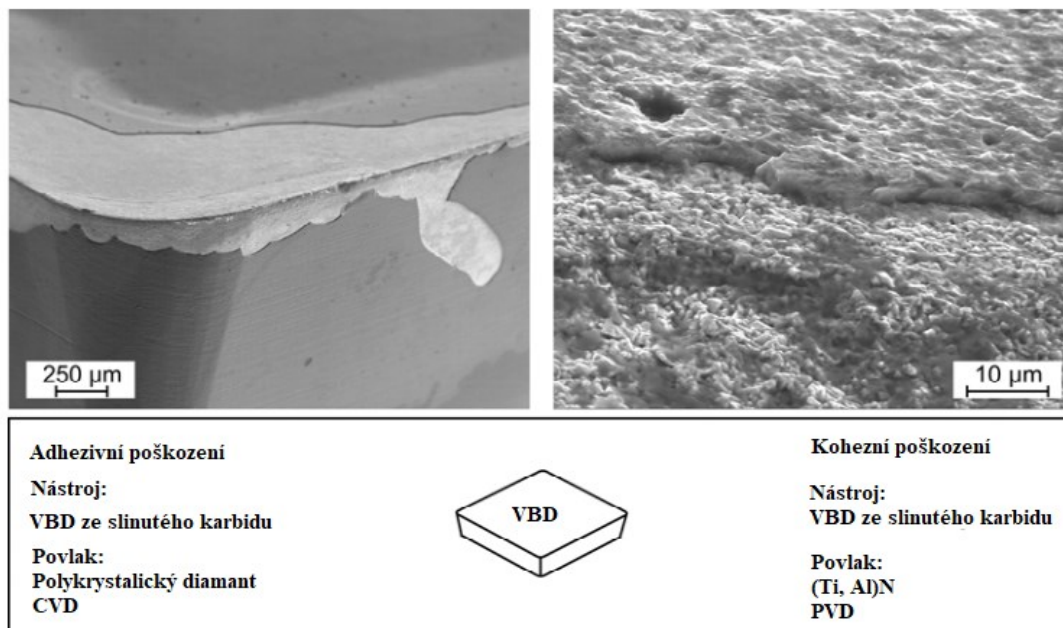


Obrázek 1.15 - Rozložení zbytkového napětí v PVD povlaku

1.3.3 Poškození řezného nástroje vlivem výskytu zbytkového napětí

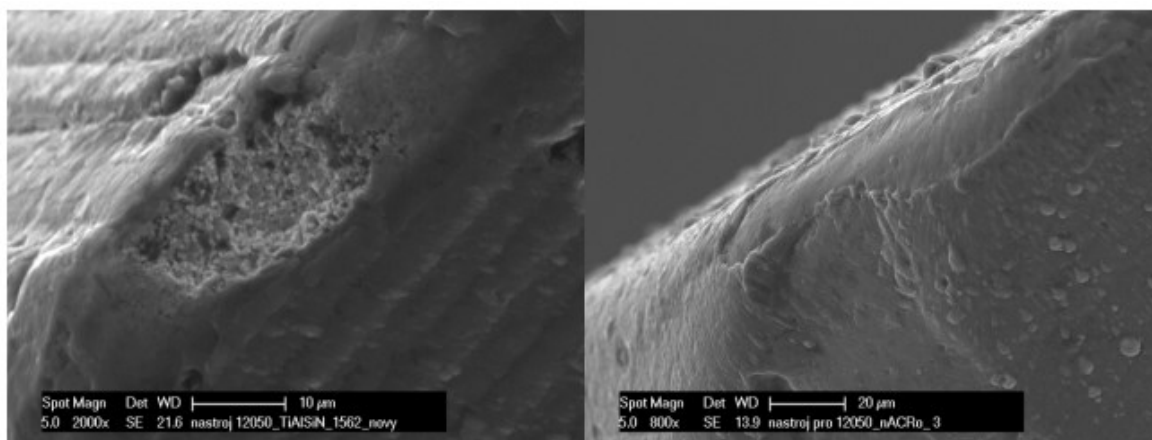
Účinek zbytkových napětí může být relativně zanedbatelný nebo naopak může mít katastrofické účinky. Tahové napětí, které překračuje mez elasticity, způsobuje popraskání povrchových tenkých vrstev kolmo ke směru tahovému napětí a určitý kritický stupeň tlakového napětí v povlaku může způsobit kohezivní nebo adhezivní selhání. Na obrázku 1.16 je zobrazeno poškození nástroje po depozici, které potvrzuje obecnou myšlenku, že k poškození dochází vlivem překročení zbytkových napětí v podpovrchové vrstvě slinutého karbidu. Během povlakování metodou CVD, kdy působí vyšší teploty, dochází k vyrelaxování zbytkových napětí vyvolaných broušením slinutého karbidu. Zbytková napětí v povrchu vytvořené CVD technologií mají vlivem rozdílné tepelné roztažnosti v průběhu povlakování tahový charakter, na který slinutý karbid reaguje tlakovým napětím, což snižuje iniciaci trhlin a tím i nebezpečí poškození. V důsledku tohoto přechodu je poškození vytvářeno v oblasti rozhraní-tenká vrstva-slinutý karbid a vzniká adhezní poškození. Naopak při procesu PVD depozice řezného nástroje zobrazeného na obrázku

vpravo dochází ke vzniku tlakových napětí, kdy případné vnesené tlakové napětí ve slinutém karbidu nerelaxuje a v důsledku toho dochází ke kohezivnímu poškození řezného nástroje.^{5,17}



Obrázek 1.16 – Poškození povlakovaného řezného nástroje ze slinutého karbidu¹⁷

Při kohezivním poškození dochází k dvěma různým pohledům na danou problematiku. Jeden z myšlenkových směrů, který ve svém výzkumu uvedl Antonín Kříž a kol.⁵ uvádí, že zvyšující se tlakové napětí v PVD povlaku má za následek další nárůst tlakového napětí v oblasti slinutého karbidu. Pevnost v tlaku slinutého karbidu se pohybuje přibližně okolo hodnoty 5000 MPa, kdy při jejím dosažení dochází ke vzniku kohezivního poškození. Na obrázku 1.13 vlevo lze vidět poškození způsobené vlivem vyčerpání plastických vlastností kobaltového pojiva, které má obecně tlumící účinky. Pokud napětí přesáhne mez pevnosti v tlaku přímo ve vrstvě, dojde ke kohezivnímu poškození viz. obrázek 1.17 vpravo.^{5,17}

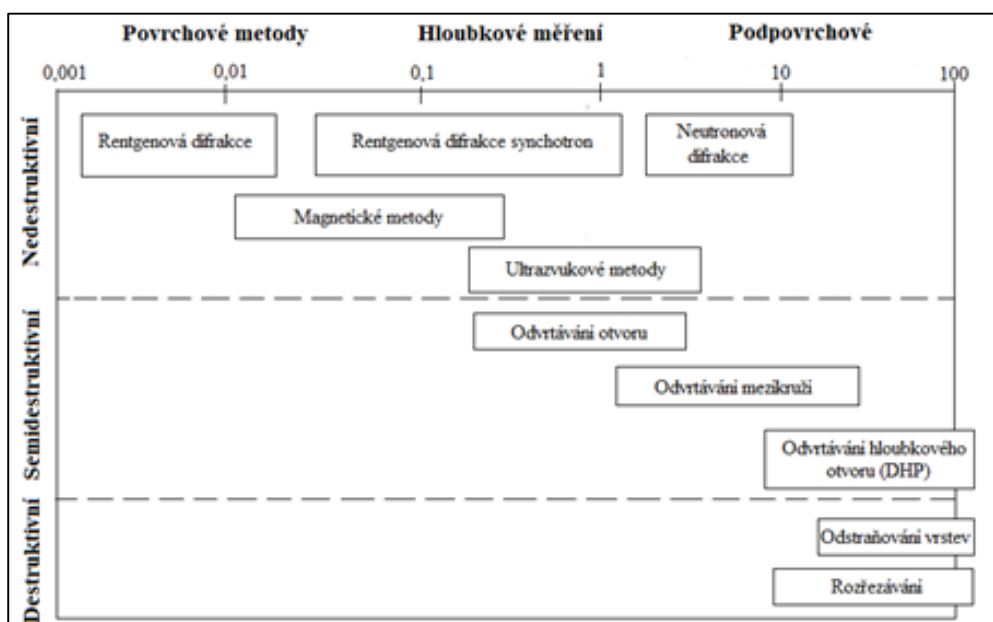


Obrázek 1.17 – Kohezivní poškození slinutého karbidu (vlevo) a kohezivní poškození vrstvy (vpravo)¹⁷

Druhým směrem se ubírají výsledky výzkumu B. Danken¹⁷, který naopak poukazuje na pozitivní vliv zbytkových napětí v deponované vrstvě a substrátu na životnost řezného nástroje. Uvádí, že do SK by mělo být vneseno tolik tlakových zbytkových napětí, kolik materiál je ještě schopen snést a tím bude rozdíl mezi tlakovým napětím v povlaku a v substrátu minimální a sníží se riziko kohezního poškození. Pokud napětí mezi vrstvou a SK budou v rovnováze, pak dle jeho poznatků nehrozí dosažení nebezpečných tahových napětí způsobující poškození. Na základě jeho výsledků a poznatků, které tvrdí že tlakové napětí má na povrch slinutého karbidu příznivý účinek, bylo provedeno několik dalších experimentů, které jeho myšlenky potvrdily. Jestliže tlakové napětí je minimalizováno, pak šíření trhlin je snadnější, respektive lomová houževnatost klesá. Rovněž je důležité podotknout, že hodnoty tlakových napětí se pohybovaly v intervalu 100-1900 MPa, takže v případě, kdy hodnoty se limitně budou blížit ke kritické hodnotě pevnosti slinutého karbidu v tlaku, mohou nastat jiné podmínky a dojde ke koheznímu poškození.^{5, 17}

1.4 Metody měření zbytkových napětí

Měření zbytkových napětí je velmi složitý proces a ještě výrazně složitějším zůstává porozumět dosaženým hodnotám. V současné době existuje řada metod pro měření zbytkových napětí a lze je obecně rozdělit na destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní. Destruktivní metody jsou založeny na změně napěťového stavu odstraněním části materiálu a následným měřením deformace odpovídající této změně zatímco nedestruktivní metody fungují na principu závislosti mezi fyzikální nebo krystalickou vlastností materiálu a zbytkovým napětím. Všechny metody mají společnou vlastnost a to, že jsou nepřímé. Pro měření napětí není k dispozici žádná přímá metoda, takže velikost napětí je vypočtena nebo odvozena z měřené veličiny, jako je elastické napětí nebo posunutí. Pro měření zbytkové napjatosti v povrchových vrstvách řezných nástrojů se v současné době využívá nedestruktivní metoda rentgenové difrakční tenzometrie.²



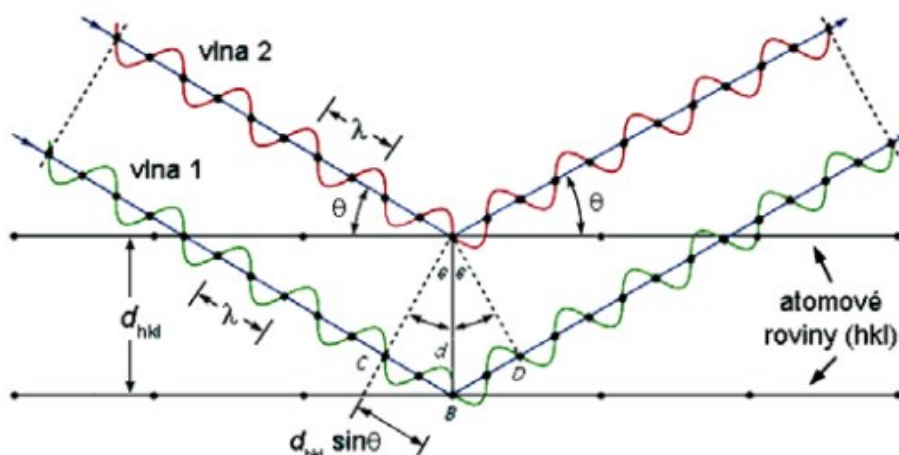
Obrázek 1.15 – Metody měření zbytkových napětí²

1.4.1 Rentgenová difrakční tenzometrie

Rentgenová difrakční tenzometrie (XRD) je nedestruktivní testovací metoda, pomocí které lze měřit povrchové napětí polykrytalických materiálů s relativně malou nebo jemnou velikostí zrn. Principem rentgenové tenzometrie je využití rozptylu (difrakce) rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin $\{hkl\}$ vyvolaných napětím. Za určitých podmínek dochází ke konstruktivní interferenci difraktovaného záření a směr difraktovaného svazku je přesně definován.^{2, 24} Tyto podmínky stanovuje Braggův zákon a lze odvodit vztah pro konstruktivní interferenci:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin(\theta), \quad 1.8$$

kde n je celé číslo (řád difrakce), λ je vlnová délka použitého RTG záření, d_{hkl} je vzdálenost meziatomových rovin $\{hkl\}$, na kterých docházelo ke konstruktivní interferenci a θ je úhel mezi směrem difraktovaného záření a strukturálními rovinami.



Obrázek 1.16 - Princip Braggova zákona

V materiálu, kde se vyskytuje napětí je známa vlnová délka rentgenového záření λ , naopak není známa vzdálenost mezi atomovými rovinami d_{hkl} a difrakce jsou pozorovány pod úhlem θ . Napětí způsobuje malé změny ve vzdálenosti d a posune difrakční úhel. Lze tedy pozorovat, že pokud v tělese existují zbytková napětí, je těleso deformováno a mění se meziorovinné vzdálenosti rovin. To má za následek změnu difrakčního úhlu θ . Zbytková napětí jsou pak stanovena z difrakčních dat pomocí výpočtu napětí z poloh difrakčního píku. Jakékoli napětí, včetně zbytkového napětí, vyvolává napětí, které odpovídá změnám ve vzdálenosti mezer a vypočítá se měřením vzdálenosti mřížky s více úhly náklonu a vynesení výsledků do grafu. Výpočet napětí je ovlivněn materiálovými parametry, jako jsou rozdíly v mřížkových parametrech či intersticiální obsazení.^{24, 26}

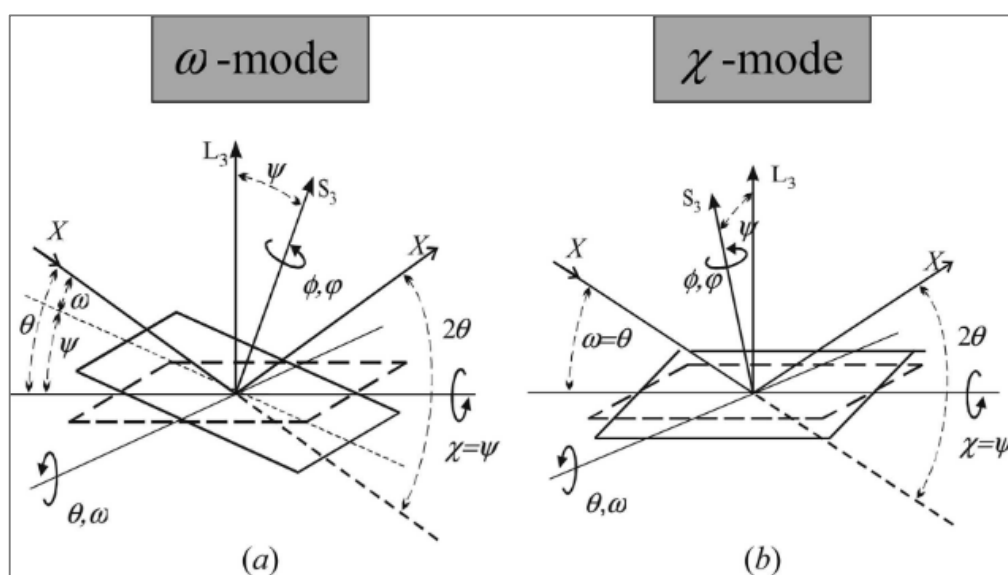
Mnoho kovových vzorků silně absorbuje rentgenové záření, a proto je intenzita dopadajícího paprsku velmi snížena ve velmi krátké vzdálenosti pod povrchem.. Standardní metodou pro stanovení zbytkového napětí je metoda $\sin^2\psi$, která používá naklonění χ

(naklopení vzorku kolem osy, která je definována průnikem difrakční roviny a povrchu vzorku) nebo ω naklápění (otáčení vzorku kolem osy kolmé k difrakční rovině shodné s osou difrakčního úhlu). Hloubka vnikání se u této metody v průběhu měření mění v závislosti na naklápění vzorku. V důsledku profilů hloubky napětí mohou být hodnoty napětí stanovené standardní analýzou ($\sin 2\psi$) chybné. Z tohoto důvodu je výhodné využívat metodu měření s konstantní hloubkou vnikání, která má zřetelnou výhodu v tom, že stav namáhání odpovídající konkrétní hloubce vnikání lze přímo odvodit z naměřených deformací mřížky. Jedna z metod využívající měření téměř v konstantní hloubce využívá kombinovaného naklápění ω a χ a její hlavní podstatou je udržovat konstantní hloubku vniku správným výběrem úhlu dopadu, výstupního úhlu přicházejícího paprsku a difrakčního paprsku.²⁷

Geometrie XRD

V následujících bodech budou definovány nástrojové úhly použité pro popis difrakční geometrie. Úhly ϕ a ψ , které definují vztah mezi geometrií vzorku a difrakcí, je třeba odlišit od úhlu natočení 2θ , ϕ , ω a χ , které jsou definovány nastavením přístroje.²⁷

- 2-theta (2θ) - úhel mezi dopadajícím a difrakčním rentgenovým paprskem (tzv. „Braggův úhel“).
- Omega (ω) - úhel mezi dopadajícím rentgenovým paprskem a povrchem vzorku.
- Psi (ψ) - úhel natočení vyhodnocované roviny vůči normále povrchu.
- Chi (χ) - úhel rotace vzorku kolem osy definované průnikem difrakční roviny a povrchu vzorku.

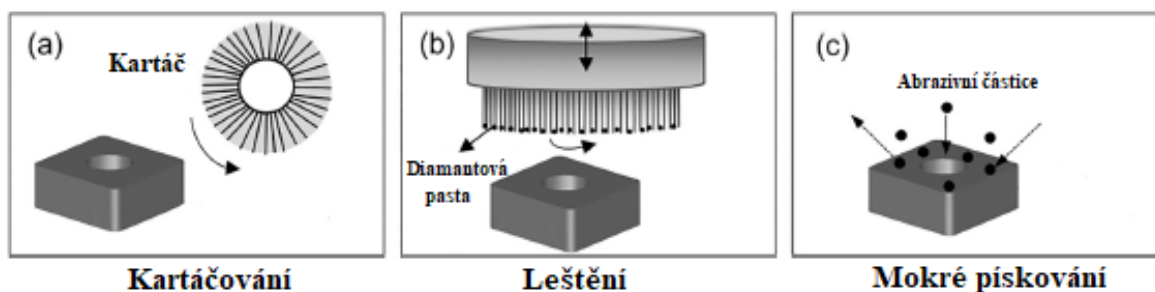


Obrázek 1.17 - Definice úhlů pro popis difrakční geometrie pomocí režimu ω (a) a režimu χ (b)²⁷

2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY PO POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Jak již bylo blíže uvedeno v kapitole 1, nástroje s CVD povlaky vykazují značná tahová napětí zejména v důsledku teplotní roztažnosti mezi povlakem a substrátem a vyvábí se trhliny, které během aplikace obráběcího nástroje mohou způsobit předčasné selhání nástroje. Proto v současné době řada výrobců uvádí na trh nové typy CVD povlaků se sníženou úrovní vnitřních napětí. To je přínosné především u operací, které jsou spojeny se zvýšeným rizikem celkového lomu v důsledku tepelných a chemických účinků. Tloušťka povlaku tak může být větší, aniž by byla ohrožena houževnatost řezného nástroje. V důsledku toho lze s nástrojem obrábět při vyšších řezných rychlostech a přitom s delší trvanlivostí a s lepší předvídatelností. Pro eliminaci výskytu a šíření trhlin se proto do výrobního procesu řezného nástroje zavádějí technologie povrchových úprav po depozici. Cílem této operace je vyvolat v povlaku tlaková zbytková napětí, která stlačují trhliny vytvořené během CVD depozice a pozitivně tak ovlivňují životnost řezného nástroje.

Existuje několik aplikovatelných technologií pro snížení tahové zbytkové napjatosti v řezných nástrojích po jejich depozici. Rozsáhlou metodou je metoda mokrého pískování, kterou aplikuje řada výrobců řezných nástrojů, a u které byl potvrzen příznivý účinek na prodloužení životnosti nástroje v souvislosti se zbytkovým napětím. Dalšími možnými metodami, které lze použít je technologie kartáčování či leštění. U těchto metod byl zaznamenán pouze nízký účinek na stav zbytkové napjatosti, a proto nemají v dané oblasti tak široké uplatnění. V současné době se pozornost začíná zaměřovat i na metodu kuličkování (Shot Peening), která se stává výzvou ve výzkumu některých výrobců řezných nástrojů. Použitím těchto uvedených metod a jejich vhodně zvolených parametrů procesu může být do povlaku vneseno tlakové zbytkové napětí, což pozitivně ovlivňuje mechanické vlastnosti nástroje. Vzhledem k tomu, že se jedná o technologie s mechanickým účinkem, je nutné dbát na parametry procesu, aby nedošlo k poškození naneseného povlaku a tím k případnému snížení jeho funkce a trvanlivosti v řezném procesu.

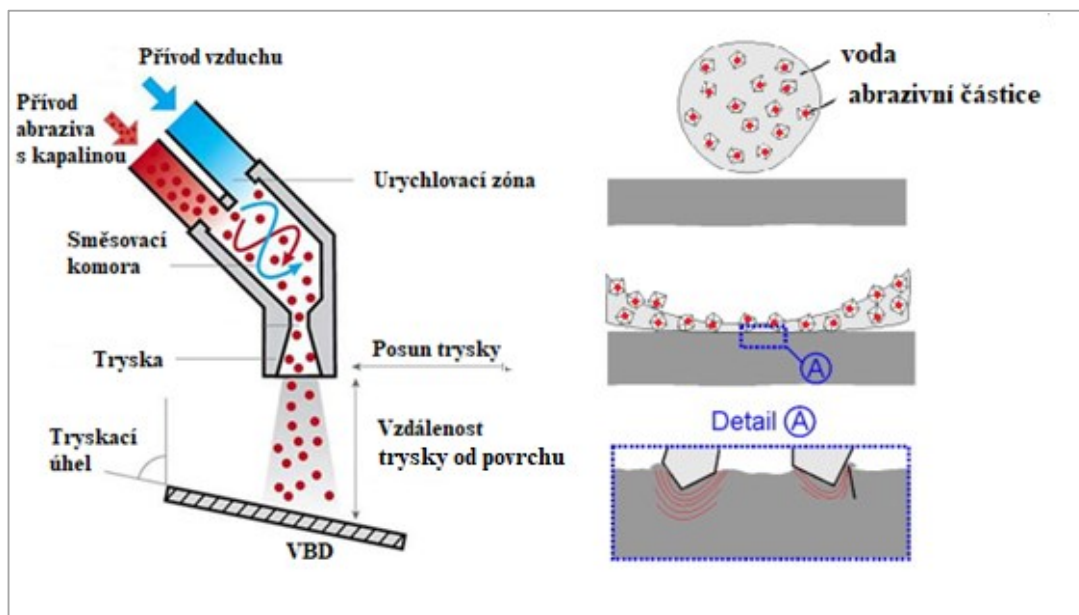


Obrázek 2.1 - Aplikovatelné technologie po povrchovou úpravu řezného nástroje ²⁸

2.1 Mokrý pískování

Technologie mokrého pískování je jednou z efektivních metod, aplikovaná řadou významných výrobců řezných nástrojů, kterou lze dosáhnout zvýšení tlakové napjatosti v povrchové vrstvě nástroje a tím i zvýšení výkonu nástroje v řezném procesu. Jedná se o řízený proces, kdy kombinací abrazivních částic, vody a stlačeného vzduchu dochází k požadované povrchové úpravě. Vysoká kinetická energie abrazivních částic vyvolává na povrchu nástroje plastickou deformaci, která způsobí změnu zbytkové tahové napjatosti v tlakovou. Tímto účinkem nastává v povlaku uzavírání trhlin, vzniklých během CVD depozice. Z tohoto důvodu je hlavním cílem mokrého pískování CVD povlaků udržet trhliny v uzavřeném stavu během řezného procesu, a tím zvýšit životnost nástroje. Kromě zvýšení zbytkové napjatosti dochází i k úpravě topografie povrchu. Nejběžněji využívané abrazivní médium je růžový oxid hlinitý (Al_2O_3) nebo oxid zirkoničitý (ZrO_2) s velmi jemnou zrnitostí, přičemž jednotlivé typy se liší v závislosti na velikosti částic a obsahu dalších příměsí. Velikost a charakter zbytkové napjatosti se odvíjí na zvolených parametrech technologie mokrého pískování a jejich vzájemné kombinaci. Parametry, které významně ovlivňují zbytková napětí, jsou následující:

- tlak vzduchu [MPa]
- typ abrazivního média a velikost částic [μm]
- úhel dopadu částic [$^\circ$]
- posuv trysky [mm]
- vzdálenost trysky od povrchu [mm]



Obrázek 2.1 - Princip mokrého pískování ²⁹

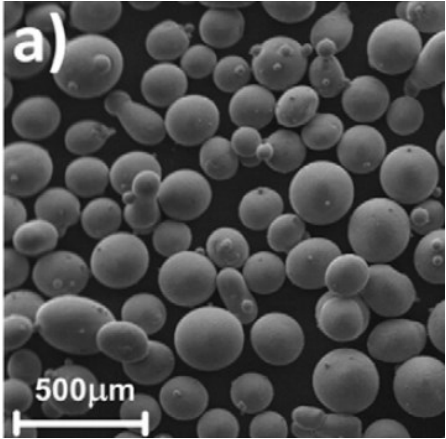
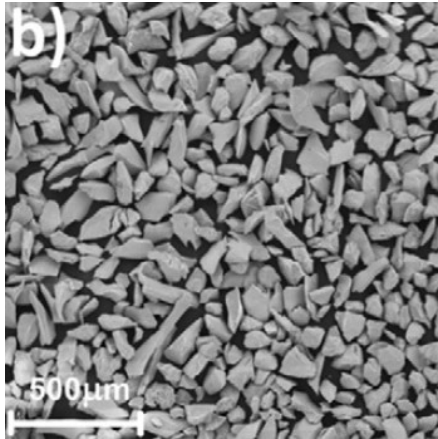
Metodou mokrého pískování se do povrchu nástroje indukují tlaková zbytková napětí, která zvyšují jeho tvrdost a zároveň i křehkost. Současně dochází ke změně drsnosti a ke snížení tloušťky povlaku. Vzhledem k tomu, že se jedná o mechanický způsob úpravy

a dochází zde ke kontaktu abrazivních částic s povlakem, je nutné dbát na správné zvolení procesních parametrů i z toho důvodu, aby nedošlo k poškození deponované vrstvy, které by se následně mohlo projevit jeho selháním v řezném procesu. Bylo prokázáno, že velikost plastické deformace se zvyšuje s rostoucí rychlostí a velikostí částic. Mokré pískování pro CVD povlaky lze tedy považovat za účinnou metodu, jen pokud nastavení mezi procesními parametry vede ke zlepšení životnosti nástroje.

2.1.1 Analýza současného stavu technologie mokrého pískování

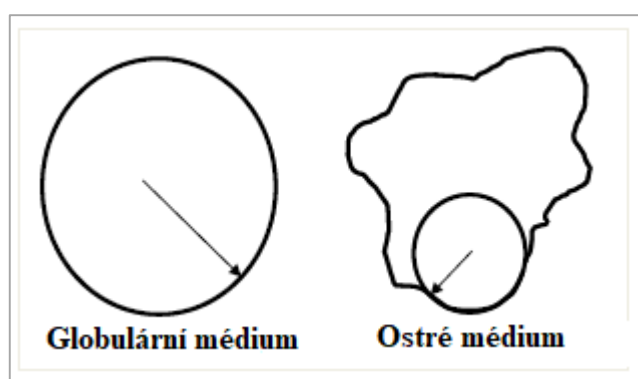
Tkadletz a kol.³⁰ zkoumali účinek tryskacího média na změny zbytkové napjatosti ve vícevrstevném povlaku slinutého karbidu deponovaného metodou CVD se základní vrstvou tvořenou TiCN a vnější vrstvou Al₂O₃. Pro výzkum byly použity dva druhy abrazivních částic, jejichž vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2. Pískování probíhalo za konstantního tlaku 0,15 MPa a úhlu pískování 15°.

Tabulka 2 - Typy pískovacího média

Typ média	Globulární	Ostré
		
Velikost částic	125 – 250	180/220 mesh
Tvrdost	700 HV	200 HV
Chemické složení	62% ZrO ₂ 28 SiO ₂ 5 % Al ₂ O ₃	55% Al ₂ O ₃ 42% ZrO ₂

Výsledky experimentu dokazují, že oba typy zvoleného pískovacího média měly značný vliv na změnu tahové zbytkové napjatosti v tlakovou, zejména ve vrstvě Al₂O₃, zatímco vrstva TiCN vykazovala pouze mírné úrovně změny napětí. Vzorky opískované pomocí ostrého média vykazovali nejvyšší hodnotu tlakové napjatosti 4 GPa se strmým gradientem napětí. Naproti tomu vzorky opískované globulárními částicemi dosáhly maximální hodnoty 4 GPa v tlaku s méně strmým sklonem. V blízkosti oblasti substrátu nenastala žádná významná změna zbytkové napjatosti pro vzorek opískovaný ostrým médiem. Naopak

vzorky upravené globulárním médiem vykazovaly výrazně zvýšené tlakové napětí až o 400 ± 60 MPa ve srovnání s neopískovaným povlakem, kde se napětí pohybovalo v rozmezí 90 ± 30 MPa. Globulární částice mají vyšší hmotnost ve srovnání s ostrým médiem a větší kontaktní poloměr (obrázek 2.3). Z tohoto hlediska ostré médium dosahuje poměrně vysokých hodnot zbytkové napjatosti, ale v poměrně omezené hloubce. Naproti tomu globulární médium vyvolává nižší hodnoty napětí, ale ovlivněná hloubka dosahuje až k substrátu.



Obrázek 2.3 - Kontaktní poloměr pískovacích médií

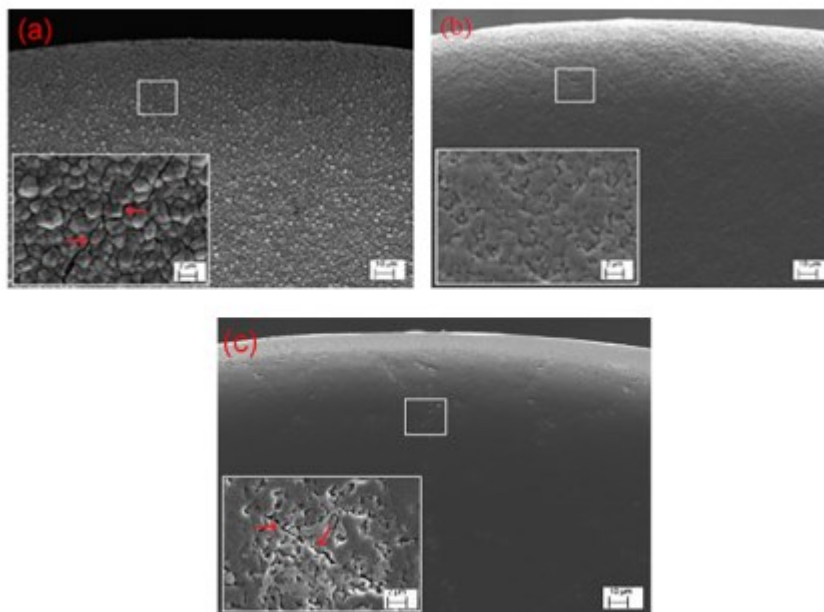
Zhong a kol.²⁸ prověřili vliv technologie mokrého pískování a leštění na velikost zbytkové napjatosti v CVD povlaku ve vrstvě Al_2O_3 . Vzorky byly opískovány abrazivními částicemi oxidu hlinitého o zrnitosti 280 – 320 mesh a leštěny kartáči s vlákny o zrnitosti 90 – 120 mesh (průměrná velikost částic $d = 48 \mu\text{m}$) a diamantovou pastou se zrny 2 – 4 μm . Tlak pískování byl nastaven na hodnotu 0,15 MPa, úhel pískování 60° a vzdálenost mezi tryskou a vzorkem byla stanovena na hodnotu 150 mm. Velikost zbytkového napětí (tabulka 3) byla vyhodnocena pomocí rentgenové difrakční tenzometrie.

Tabulka 3 - Velikost zbytkové napjatosti po povrchových úpravách²⁸

Stav vzorku	Napětí [MPa]
Po depozici	$+ 304 \pm 45$
Leštěný	$+ 232 \pm 48$
Mokře pískovaný	-1612 ± 94
Mokře pískovaný + leštěný	-1710 ± 137

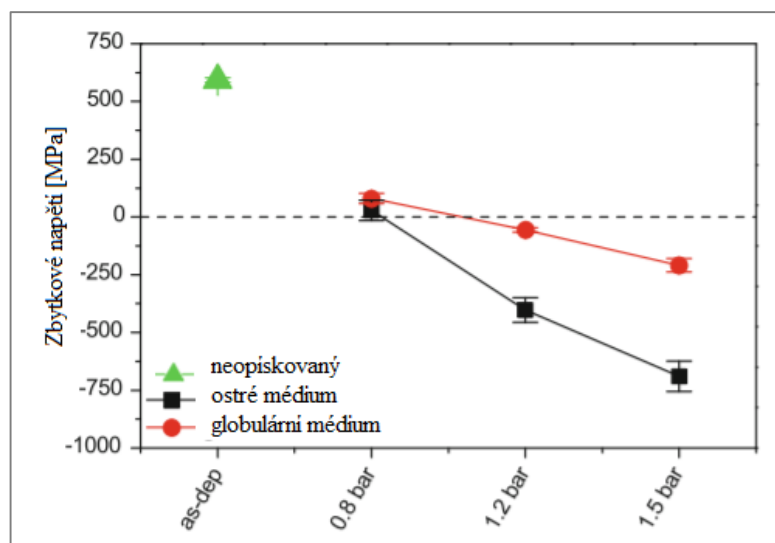
Na obrázku 2.4 jsou znázorněny povrchy vzorků po povrchové úpravě CVD povlaku. Během procesu pískování za mokra (obr. 2.4 b) lze vidět, že vlivem dopadu abrazivních částic a vyvoláním tlakové napjatosti dochází k uzavírání trhlin. Naopak metodou leštění deponované vrstvy nedošlo k vyvolání tlakové napjatosti a v povlaku nadále zůstávají napětí v tahu. Dodatečným leštěním opískovaného povrchu nastal pouze mírný účinek zvýšení tlakové napjatosti. Při porovnání výsledků z hlediska trvanlivosti během řezné zkoušky, bylo

zjištěno, že povrchovou úpravou mokrým pískováním, kde bylo vyvoláno tlakové napětí, dosáhly vzorky o 31 % vyšší životnosti než vzorky leštěné.



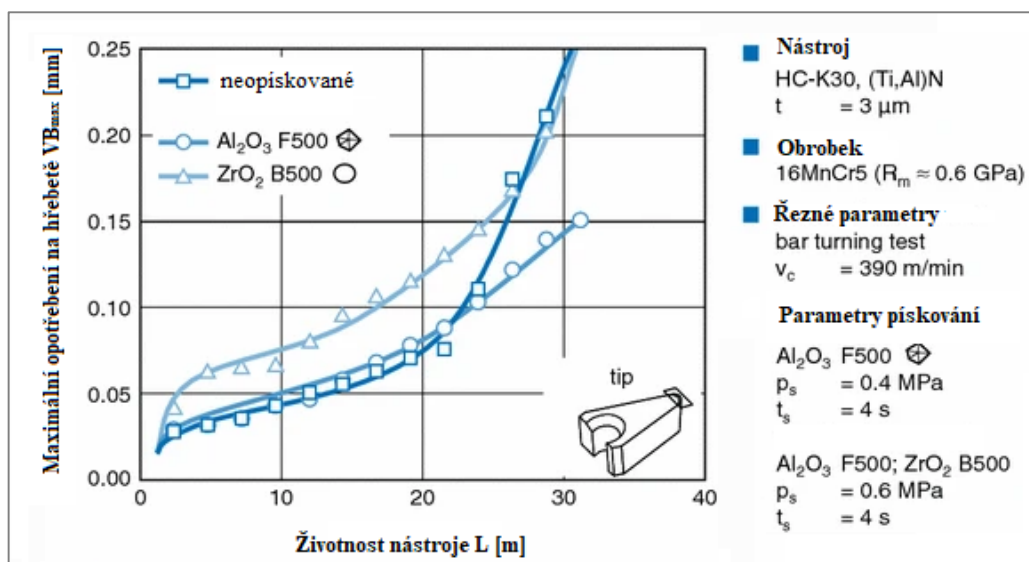
Obrázek 2.4 - Povrch po deposici (a), po mokrém pískování (b), po mokrém pískování a leštění (c) ²⁸

Shalk a kol. ³¹ v rámci svojí experimentální práce zkoumali zbytková napětí v povlacích Al_2O_3 , pískovaných za sucha při různých hodnotách procesního tlaku a dvou typů abrazivních medií. V procesu pískování bylo aplikováno globulární médium (62% ZrO_2 , 27,8% SiO_2 , 4,6 Al_2O_3) a ostré médium (54,5 % Al_2O_3 , 41,5 % ZrO_2) při třech zvolených hodnotách tlaku (0,8; 1,2; a 1,5 bar). Úhel nastavení trysky byl 15°. Výsledky (obr. 2.5) ukazují, že se zvyšujícím se tlakem, bez ohledu na typ abrazivního média, roste velikost zbytkové napjatosti v tlaku.



Obrázek 2.5 - Vývoj tlakové napjatosti v závislosti na tlaku a typu média ³¹

Potvrzením těchto účinků se zabírali i Klocke a kol.³², kteří rovněž potvrdili, že se zvyšujícím se tlakem roste tlaková zbytková napjatost. Výsledky jejich experimentu ukazují, že čím vyšší je tlak a čím větší je velikost částic, tím více dochází ke snížení tloušťky povlaku. U ostrých částic byl, zaznamenaný vyšší úběr materiálu než u globulárního média. Z tohoto důvodu je potřeba volit velmi jemné částice a správné nastavení parametrů, aby došlo k minimálnímu ovlivnění tloušťky povlaku. Pro zvolené parametry a médium byla provedena zkouška trvanlivosti nástroje (obr. 2.6). Nejlepší hodnoty opotřebení $L=31$ m vykazovalo abrazivní médium Al_2O_3 .



Obrázek 2.6 - Zkouška řezivosti³²

Z uvedených experimentálních činností z oblasti technologie mokrého pískování a jeho vlivu na velikost a charakter zbytkové napjatosti lze vyvodit několik důležitých závěrů:

1. S rostoucí hodnotou procesního tlaku roste tlaková napjatost v deponované vrstvě.
2. Ostré pískovací médium vyvolává vysoké hodnoty tlakové napjatosti, ale pouze v omezené hloubce.
3. Globulární médium ovlivňuje zbytkovou napjatost v hloubce až k substrátu. Gradient napětí je méně strmý než u ostrého média.
4. Tlakové zbytkové napětí podporuje uzavírání trhlin v CVD povlaku řezného nástroje, a tím zvyšuje jeho životnost v řezném procesu.

Z těchto výsledků lze konstatovat, že zvýšení životnosti řezných nástrojů deponovaných metodou CVD lze dosáhnout správným zvolením parametrů technologie pískování. V dostupné literatuře doposud není k dispozici komplexní pochopení účinků mokrého pískování na vývoj tlakové zbytkové napjatosti a zaručení vyšší trvanlivosti nástroje během řezného procesu. Z tohoto důvodu se další část diplomové práce bude zabývat metodou mokrého pískování a jejím vlivem na velikost zbytkových napětí v povlaku řezného nástroje z pohledu více procesních parametrů, než je pouze použité pískovací médium nebo procesní tlak. Důležitým sledovaným parametrem bude i zajištění opakovatelnosti výroby.

3 METODICKÝ POSTUP EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

Experimentální část diplomové práce bude pojednávat o vlivu povrchové úpravy pomocí technologie mokrého pískování na změny zbytkové napjatosti v povrchové vrstvě řezného nástroje. Experiment je koncipován pro vzorky vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu deponovaných metodou CVD, u kterých se předpokládá vysoká náchylnost k tahové zbytkové napjatosti, která značně snižuje životnost nástroje zejména při přerušovaném řezu. Pozornost bude zaměřena na dvě následující oblasti.

V první fázi experimentu proběhne ověření jakým způsobem a do jaké míry ovlivňují zkoumané parametry charakter a velikost zbytkové napjatosti v CVD povlaku po povrchové úpravě mokrým pískováním. Pro prokázání, zda povrchová úprava mokrým pískováním zvyšuje životnost řezného nástroje, bude provedena zkouška řezivosti při přerušovaném řezu. Na základě těchto výsledků bude v další fázi předmětem zkoumání, které parametry a příčiny ovlivňují stabilitu výrobního procesu. Cílem bude dosáhnout takových parametrů procesu, které zaručují opakovatelnost výroby s ohledem na zachování trvanlivosti testovaných řezných nástrojů (tzn. vnést podobné hodnoty zbytkového napětí do všech VBD, aby životnost nástrojů dosahovala stejné úrovně). Zadání této práce vychází z požadavků společnosti Dormer Pramet s.r.o, ve které byla veškerá experimentální činnost prováděna.

Cíle experimentální části:

- Provést experimentální testy mokrého pískování vzorků při předem stanovených parametrech procesu
- Změřit velikost zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakční tenzometrie
- Zhodnotit chování zbytkové napjatosti v povrchové vrstvě
- Provést funkční zkoušku obrábění testovaných VBD
- Na základě provedených experimentů vyhodnotit parametry a příčiny, které ovlivňují opakovatelnost a stabilitu výrobního procesu.
- Provést analýzu všech dosažených výsledků a stanovit přínosy a případná doporučení pro výzkum a praxi

3.1 Typ testovaného řezného nástroje

V rámci experimentu byly zvoleny pro testování vzorky frézovacích VBD ze slinutého karbidu s typovým označením SPKN1203EDER. Jedná se o VBD na bázi WC-Co substrátu o velikosti zrn s obsahem kobaltového pojiva. Povlak deponovaný metodou CVD, tvoří základní vrstva TiCN o tloušťce μm nanesená za teploty a vnější vrstva je tvořena Al_2O_3 o tloušťce $5,22 \mu\text{m}$ deponovaná za teploty z plynné fáze $\text{AlCl}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{-H}_2\text{S}$. Tento typ VBD byl rovněž zvolen s ohledem na to, aby bylo umožněno

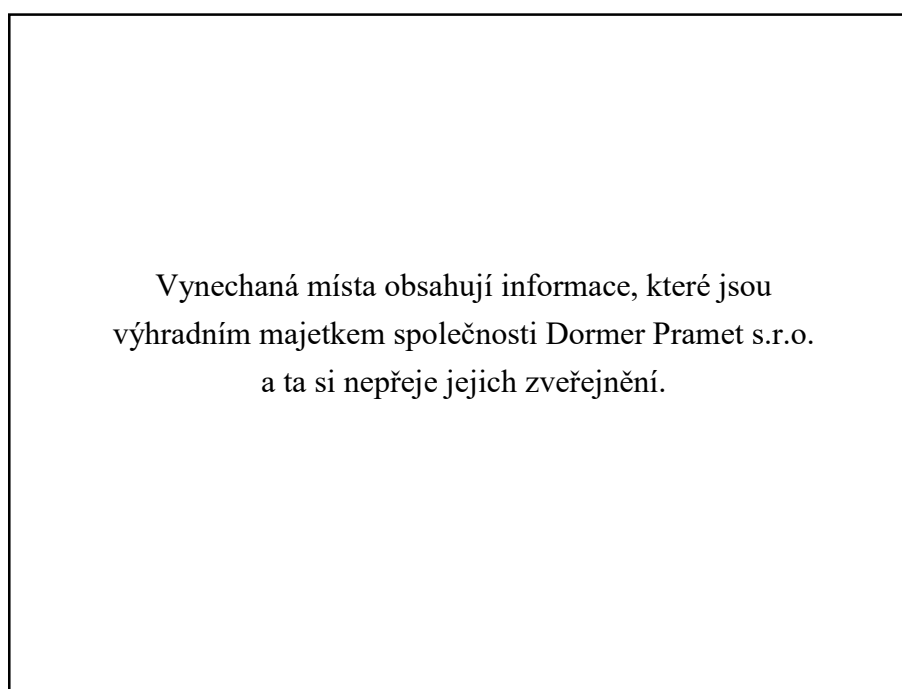
změřit zbytkovou napjatost v povrchových vrstvách pomocí rentgenové difrakční metody, pro kterou je potřeba rovinnou plochu bez utvářeče třísek, aby byly získány spolehlivé výsledky měření.



Obrázek 3.1 - Testované vzorky

3.2 Pískovací stroj

Vzorky byly pískovány na plně automatizovaném stroji Vapormatt Tiger (obr. 3.2). Stroj je vybaven 16 tryskami, které dopravují abrazivní médium pod požadovaným tlakem na povrch VBD, kde dochází k plastické deformaci, která vyvolá změnu zbytkové napjatosti. Celý proces se skládá z několika částí. V první fázi je povrch pískován zvolenými procesními parametry, přičemž VBD jsou umístěny do speciálního přípravku, který zaručuje jejich polohu během procesu pískování. Následně v další komoře probíhá oplach od případných nečistot abrazivního média a v poslední části jsou VBD vysušeny.



Obrázek 3.2 - Pískovací stroj Vapormatt Tiger

3.3 Parametry procesu pískování

Velikost a charakter zbytkového napětí v povrchových vrstvách VBD lze ovládat parametry procesu pískování jako je například materiál abrazivního média, velikost částic, intenzita tlaku, čas pískování apod. Z hlediska ověření opakovatelnosti a kontrolovatelnosti metody mokrého pískování byly sledovány především následující parametry mokrého pískování:

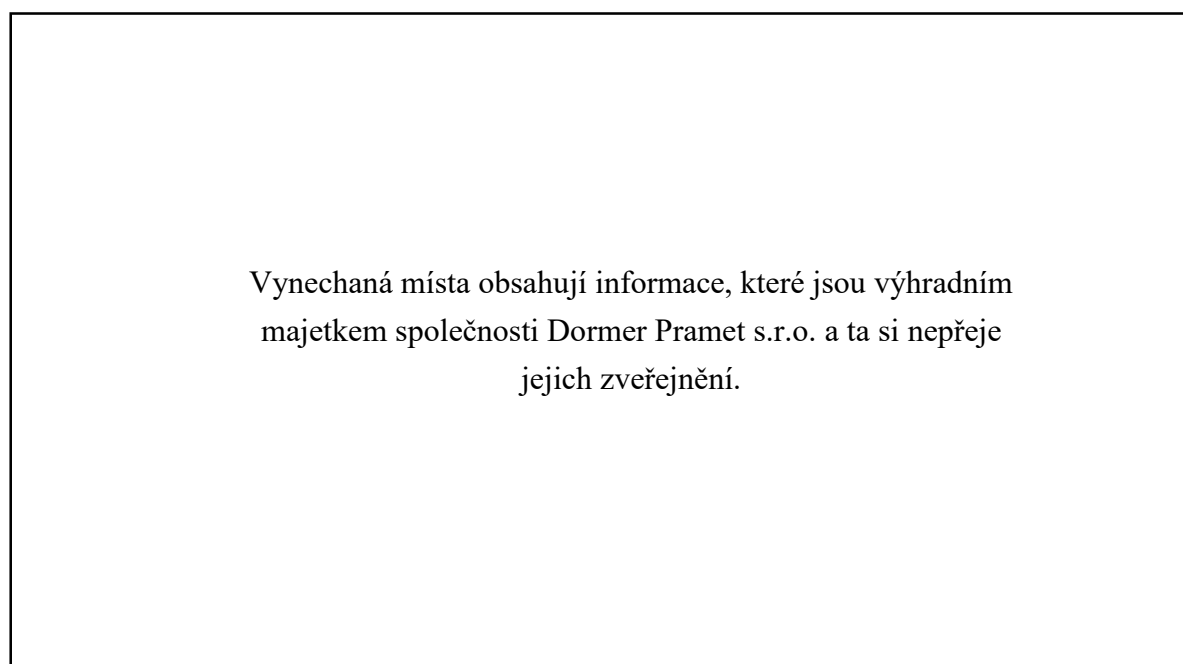
- pískovací médium (velikost a tvar částic, rychlost dopadu, opotřebení částic)
- poloha VBD v přípravku
- velikost kroku posuvu přípravku
- nastavení polohy trysek

Další důležité parametry procesu mokrého pískování:

- tlak stlačeného vzduchu
- rychlost pískování
- doba pískování

3.4 Pískovací médium

K povrchové úpravě povlakovaných vzorků VBD byly použity abrazivní částice , jehož chemické složení je uvedeno v tabulce 4. Z mikroskopického snímku na obrázku 3.3 lze vidět, že se jedná o částice ostrého tvaru, které při dopadu o vysoké kinetické energii na povrch nástroje způsobují plastickou deformaci povrchové vrstvy, která vede při správně zvolených parametrech k ovlivnění zbytkové napjatosti.



Obrázek 3.3 - Mikroskopický snímek

Pro mokré pískování byly v experimentu použity částice
o . Velikost částic oxidu hlinitého je udávána v jednotce *mesh*, která vyjadřuje počet ok síta tkaného z drátu připadajících na jeden palec (25,4 mm). Čím vyšší je číslo *mesh*, tím je jemnější zrnitost. V pískovacím stroji byl nastaven procentuální poměr abrazivního média a vody.

Tabulka 4 - Chemické složení pískovacího média

Materiál						
Množství [%]						

Tato operace probíhá rovněž na stroji Varpomatt Tiger s tím rozdílem, že stroj má jiné konstrukční provedení trysek a je zde aplikováno médium oxidu hlinitého o zrnitosti . Jednou z částí experimentu tedy bude i ověření jaký vliv má rozdílná zrnitost média a jiné uspořádání trysek na zbytkovou napjatost v testovaných vzorcích. Na obrázku vpravo (b) je vidět uložení trysek v tryskací hlavě, které je standardně používáno pro úpravu rezných nástrojů po jejich depozici. Toto uložení zajišťuje vysokou stabilitu výrobního procesu zejména tím, že je dosaženo stejné intenzity pískování celé plochy přípravku, ve kterém jsou uloženy VBD. Na obrázku vlevo (a) lze vidět systém uložení trysek, který je využíván pro zaoblení ostří VBD. Trysky jsou v hlavě upnuty tak, že proud abraziva vycházející ze všech osmi trysek se střetává v jednom bodě a to na břitu VBD. Tento systém uložení trysek zaručuje vysokou efektivitu procesu pískování, pevné a stabilní upnutí trysek, a to i při vysokém procesním tlaku vzduchu, který je během používán. V obou strojích jsou . Primární rozdíl je v úhlu jejich nastavení a tím i úhlu dopadu abrazivního média na povrch VBD.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřeje jejich zveřejnění.

Obrázek 3.4 - Konstrukční provedení trysek

Tabulka 5 - Velikost testovaných abrazivních částic

Al ₂ O ₃	Poměr abraziva a vody [%]	Velikost částic	
		[mesh]	[μm]
Typ 1			
Typ 2			

Uvedená velikost v [μm] je orientační.

V experimentální části bude pozornost v souvislosti s použitým médiem zaměřena na dvě oblasti:

1. Ověření, jaký vliv má na zbytkovou napjatost odlišná zrnitost média Al₂O₃ při různém nastavení trysek.
2. Bude sledováno, zda opotřebením částic Al₂O₃ o zrnitosti ovlivňuje velikost vnesené zbytkové napjatosti.

3.5 Funkční zkouška obrábění

Pro ověření vlivu zbytkové napjatosti na životnost řezného nástroje deponovaného CVD povlakem byla provedena funkční zkouška obrábění při přerušovaném řezu frézováním. Zkouška si kladla za cíl ověřit odolnost testovaných VBD s různými hodnotami zbytkového napětí proti vzniku teplotních trhlin, které jsou častým jevem u CVD povlaku a vedou ke zkrácení jeho životnosti. Funkční testy obrábění byly realizovány pro tři typy vzorků uvedených v tabulce 6. Hodnota zbytkového napětí byla neměřena v hloubce 2 μm. Celá zkouška probíhala ve zkušebně společnosti Dormer Pramet s.r.o.

Tabulka 6 - Přehled vzorků pro zkoušku řezivosti

Označení vzorku	Počet testovaných vzorků	Povrchová úprava	Charakter napětí	Velikost napětí $\sigma_i \pm \Delta \sigma$ [MPa]
A	2	Referenční (bez úpravy)		
B		Pískované		
C		Pískované		

3.5.1 Charakteristika použitého stroje

Řezná zkouška byla provedena na 5-osém vertikálním frézovacím centru od výrobce Kovosvit MAS s typovým označením MCV 1270 POWER, které zajišťuje vysoce efektivní obrábění díky aplikaci vysokorychlostních vřeten a vysokými rychloposuvy. Vysoká tuhost

nosného rámu stroje poskytuje jak silové obrábění, tak přesné obrábění složitých dílů. Technické parametry frézovacího centra jsou uvedeny v tabulce 5.



Obrázek 3.5 - Frézovací centrum MCV 1270 Power

Tabulka 7 - parametry MCV 1270 Power ³³

Parametr	Velikost	Jednotka
Pracovní stůl		
Upínací plocha	1500 x 670	mm
Maximální zatížení	1200	kg
Pracovní rozsah		
Osa X-Y-Z	5000 x 3600 x 3330	mm
Stroj		
Maximální otáčky vřetena	8000	min ¹
Počet míst v zásobníku	24	ks
Výkon motoru S1/S6 – 40 %	28/43	kW

3.5.2 Volba řezného nástroje a řezných podmínek

K provedení experimentu byla zvolena rovinná fréza s typovým označením 100B07R-W755P12D od výrobce Dormer Pramet s.r.o o jmenovitém průměru $D=100$ mm, kterou lze standardně osadit 6 VBD. Během funkční zkoušky obrábění byla fréza osazena pouze jednou testovanou VBD. Zvolené VBD byly blíže charakterizovány v kapitole 3.1. Standardně se tyto destičky povlakuji metodou PVD, které se při přerušovaném řezu vyznačují vyšší životností nástroje. Pro účely výzkumu byly vytvořeny prototypové VBD s povlakem CVD, které jsou během přerušovaného řezu díky CVD povlaku náchylné na vznik teplotních trhlin vlivem výskytu zbytkové napjatosti.

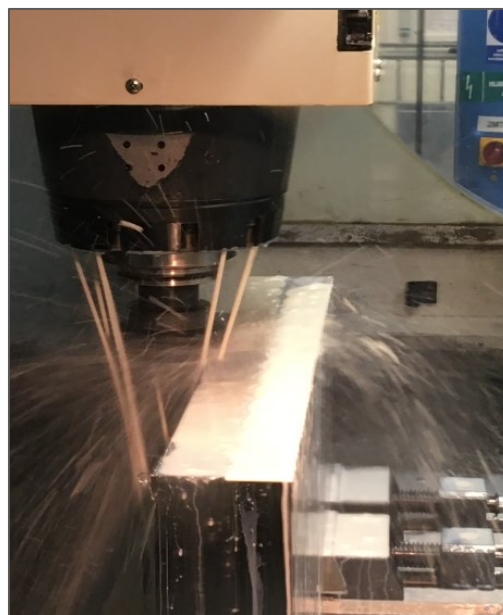


Obrázek 3.6 - Frézovací hlava W75SP12D

Tabulka 8 - Rozměry testovaných VBD

L=d	S	m	κ_r
12,7	3,18	0,88	75
mm	mm	mm	°

Pro zkoušku řezivosti byla zvolena nelegovaná uhlíková ocel jakosti C45 (12 050.1), která slouží jako etalonový materiál, který se běžně využívá pro funkční zkoušky obrábění řezných nástrojů ze slinutého karbidu. Rozměry obrobku byly 100 x 800 x 200 mm. Zkouška probíhala za předem zvolených řezných podmínek (tabulka 8), které byly po celou dobu zkoušky konstantní pro všechny testované vzorky. Řezné podmínky byly zvoleny s ohledem na to, aby bylo dosaženo rychlého vzniku teplotních trhlin a tím i rychleji vyčerpána životnost řezného nástroje. Z tohoto důvodu bylo i během celého řezného procesu zvoleno chlazení, které zvyšuje rozdíl teplot při záběru břitů do materiálu obrobku a při jeho výstupu a urychluje šíření teplotních trhlin. Celkově bylo provedeno 15 přejezdů na délce záběru 48 mm pro jeden přejezd frézy.



Obrázek 3.7 - Průběh zkoušky řezivosti

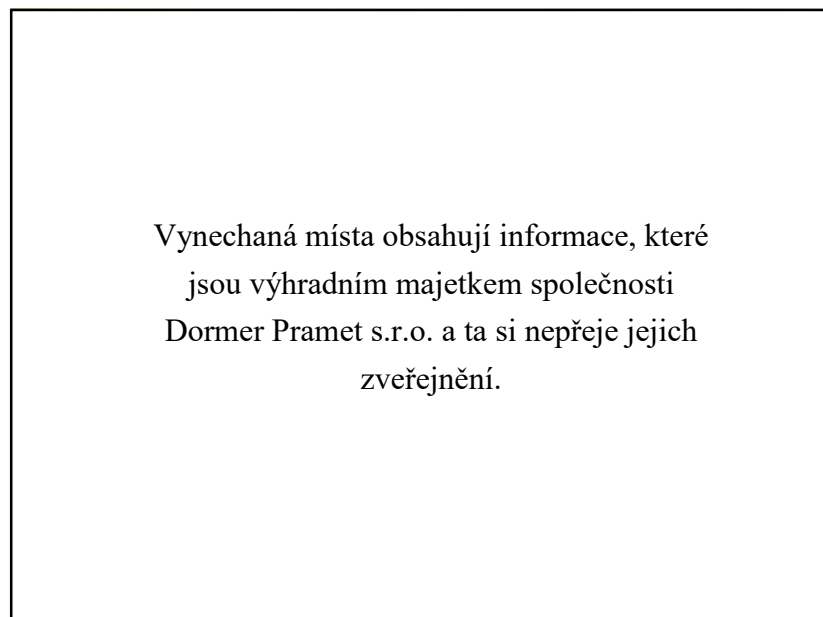
Tabulka 9 - Zvolené řezné parametry

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	400	m/min
Otáčky	n	1256	min^{-1}
Posuv na zub	f_z	0,2	mm
Rychlost posuvu	f_{mim}	251	mm
Hloubka řezu	a_p	2,5	mm
Šířka záběru	a_e	50	mm
Délka záběru (1 přejezd)	l	48	mm
Procesní kapalina	ano		

3.6 Stabilita výrobního procesu

Tato část experimentu se bude věnovat zbytkové napjatosti z hlediska výrobní stability technologie mokrého pískování. Tento fakt je ve většině výzkumných prací na toto téma zanedbáván, a proto cílem bude ověřit, zda metoda mokrého pískování při daných procesních parametrech je schopná zajistit opakovatelnost výroby. Bude zkoumáno, zda daná výrobní dávka VBD dosahuje stejné úrovně zbytkové napjatosti. Vnesením rovnoměrných hodnot napětí by mělo být zajištěno, že dané VBD budou vykazovat stejnou nebo podobnou úroveň životnosti. V opačném případě může nastat problém, že stejný typ VBD bude mít v řezném procesu různou trvanlivost a tím i celkovou životnost, což je z pohledu zákazníka nežádoucí. Z tohoto hlediska je podstatné umět zajistit opakovatelný a zároveň kontrolovatelný proces.

Během povrchové úpravy pomocí mokrého pískování jsou VBD umístěny do přípravku (obrázek 3.8), který zajišťuje jejich polohu během celého výrobního procesu. Celkově lze do přípravku uložit a následně pískovat až 304 testovaných VBD.



Obrázek 3.8 - Přípravek s uložením VBD pro proces mokrého pískování

Z časových důvodů bylo testování realizováno pro 6 pozic VBD, které jsou vyznačeny na schématu na obrázku 3.9. Konkrétní pozice byly zvoleny s ohledem na předpokládaný výskyt rozdílů ve velikosti hodnot měřené tlakové napjatosti. Pro získání informací o opakovatelnosti výrobního procesu bude provedeno celkem 5 testů, které se budou provádět s určitým časovým rozestupem, aby mohl být případně zaznamenán vliv jiných faktorů, které ovlivňují hodnoty zbytkové napjatosti (porucha stroje, životnost média apod.).

V další fázi experimentu bude probíhat pískování vzorků při různých hodnotách parametru kroku posuvu přípravku. V tabulce 10 jsou uvedeny nastavené parametry pískovacího stroje Vapormatt Tiger, za kterých pokus probíhal.

Tabulka 10 - Nastavení testovaných programů stroje Vapormatt Tiger

Parametry stroje	Jednotka	Typ programu		
		Program 1	Program 2	Program 3
Tlak vzduchu				
Vzdálenost trysek od povrchu VBD (osa Z)				
Pískovací médium Al_2O_3				
Krok posuvu přípravku				
Úhel nastavení trysek od svislé osy				
Počet trysek				

Tento experiment byl realizován celkem pro 3 různé programy mokrého pískování s rozdílným krokem posuvu přípravku, aby bylo odhaleno, zda se v přípravku s uloženými VBD vyskytují místa, která jsou pískována s rozdílnou intenzitou, což by se projevilo v rozdílných hodnotách vnesené zbytkové napjatosti. Během první fáze testování byla zkoumána současná stabilita výrobního procesu, tzn. za podmínek používaných během standardní výroby (Program 1). Po proměření pískovaných vzorků byly zjištěny opakované rozdíly v hodnotách vnesené zbytkové napjatosti. Proto došlo k experimentální úpravě v nastavení parametrů pískování, za účelem snížení rozdílů v hodnotách zbytkového napětí u jednotlivých vzorků. Byla snížena hodnota kroku posuvu přípravků na mm s cílem rovnoměrnějšího pískování celého teoretického povrchu přípravku. Jelikož snížená hodnota délky kroku v reálných podmínkách znamená delší dobu pískování vzorků, bylo pro experiment použito jen trysek. Při tomto nastavení se předpokládalo vnesení tlakového napětí o stejných hodnotách jako při původním nastavení procesu pískování (Program 1).

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřije jejich zveřejnění.

Obrázek 3.9 - Schéma pracovních pohybů stroje a uložení testovaných pozic VBD v přípravku

4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

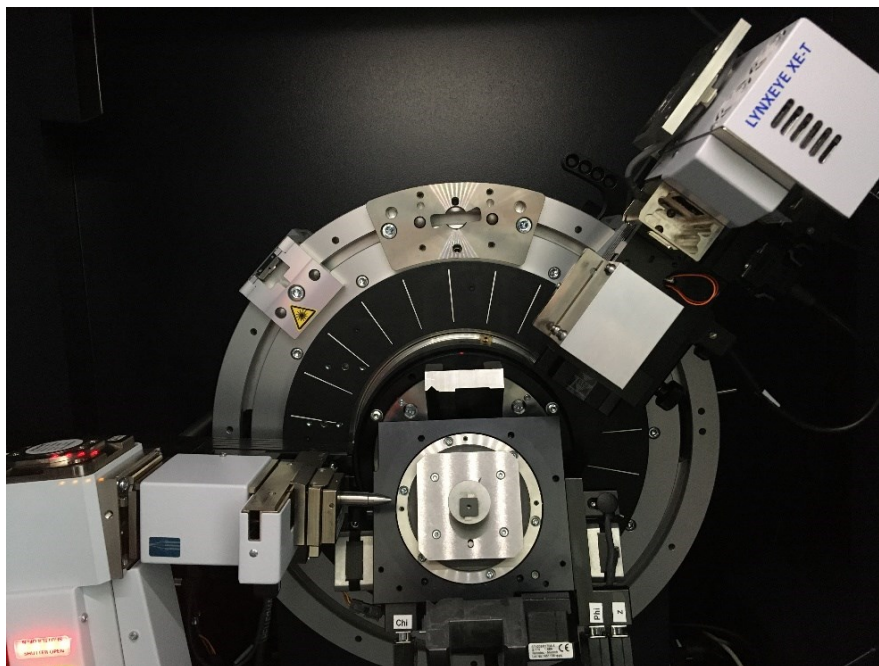
Vyhodnocení dosažených výsledků je koncipováno do dvou částí. První část je zaměřena na vliv povrchové úpravy pomocí technologie mokrého pískování na charakter a velikost zbytkové napjatosti řezného nástroje. Druhá část bude věnována hodnocení parametrů technologie mokrého pískování s ohledem na zajištění opakovatelnosti výroby a celkové stability procesu.

4.1 Vyhodnocení zbytkové napjatosti

K vyhodnocení charakteru a velikosti zbytkové napjatosti byla zvolena nedestruktivní metoda rentgenové difrakční tenzometrie. Všechny vzorky byly měřeny pomocí difraktometru Bruker Advance D8 ve dvou konstantních hloubkách za použití kombinovaného náklonu . Zkoumány byly mezirovinné vzdálenosti rovin { } při použití záření $\text{CuK}\alpha$, kterému odpovídá difrakční maximum $2\theta \approx$ °. Velikost kroku pro všechna měření byla stejná a nastavena na hodnotu °. Vyhodnocení proběhlo v programu Leptos 7.9 od společnosti Bruker, kde profil odpovídající difraktovanému záření byl aproximován funkcí Pearson VII a z polohy maxima byly vypočteny mezirovinné vzdálenosti rovin { }. Pro provedení měření napětí je vzorek umístěn do rentgenového difraktometru (obr. 4.1) a je vystaven rentgenovému paprsku, který intereaguje s krystalovou mřížkou. Hlavní řešenou úlohou je identifikace krystalových fází ve vícefázových vzorcích za pomoci databáze krystalových struktur. Parametry použité pro měření vzorků jsou uvedeny v tabulce 11. Měření pomocí rentgenové difrakce je poměrně problematické vzhledem k tomu, že se v povlacích vyskytují gradienty zbytkového napětí, které vnášejí do výsledku měření značné chyby, způsobující značné odchylky od naměřené hodnoty.

Tabulka 11 - Měřicí parametry RTG difrakce

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozsah ϕ		[°]
Rozsah ω		[°]
Rozsah ψ		$[\sin^2\psi]$
Vlnová délka $K\alpha$		$[10^{-10} \text{ m}]$
Velikost kroku		[°]
Čas		[s/krok]
Modul pružnosti v tahu		[GPa]
Poissonův poměr		[-]



Obrázek 4.1 - Měřicí zařízení Bruker D8 Advanced

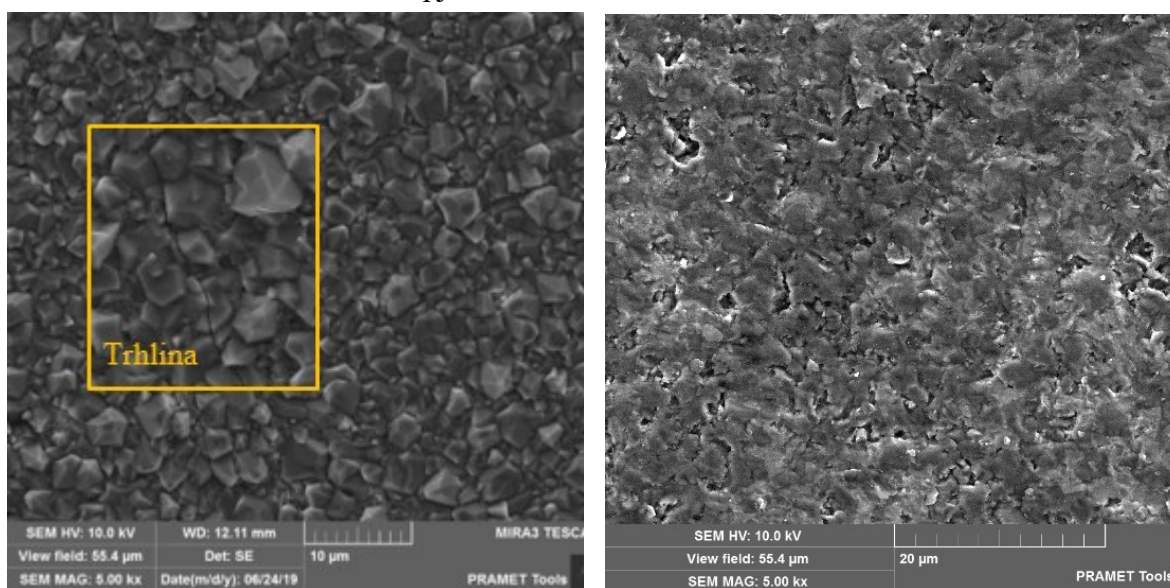
Zbytkové napětí bylo měřeno pouze ve vnější vrstvě povlaku Al_2O_3 o tloušťce μm (obrázek 4.2). Pro vyhodnocení velikosti zbytkové napjatosti byly zvoleny konstantní hloubky měření 2 a 4 μm od povrchu povlaku. Pískovací médium dosahuje nejvyššího ovlivnění na povrchu vzorku. Z tohoto důvodu by při volbě nižší hloubky mohly být výsledky nevypovídající. Naopak měření v hloubkách blíže k substrátu nebylo možné z hlediska omezení nastavení měřicího přístroje.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřije jejich zveřejnění.

Obrázek 4.2 - Vrstvy CVD povlaku testovaných vzorků

4.1.1 Vyhodnocení vlivu mokrého pískování na zbytkovou napjatost

Ze snímku 4.1 pořízeného elektronovým mikroskopem lze vidět značnou rozdílnost povrchu mezi referenčním a pískovaným vzorkem. Vrstva Al_2O_3 byla nanesena přibližně za teploty 1000°C a po ochlazení teplota klesla na teplotu okolí ($\approx 25^\circ$). Následně v důsledku materiálové nekompatibility mezi jednotlivými strukturami povlaku, a tím vznikajících diferencí v koeficientu lineární teplotní roztažnosti se vyskytuje ve vrstvě značné tahové zbytkové pnutí, vyvolávající iniciaci trhlin, které lze vidět na snímku vlevo. Vzorek vpravo je povrchově upraven metodou mokrého pískování pod tlakem MPa. Na povrchu vzorku lze zpozorovat, že dopad média na povrch má příznivý vliv na uzavírání trhlin vlivem vnesené tlakové napjatosti.



Obrázek 4.1 - Povrch referenčního vzorku (vlevo) a pískovaného vzorku (vpravo)

Pomocí metody rentgenové difrakční tenzometrie byly pro srovnání naměřeny hodnoty zbytkové napjatosti σ_i v referenčních a pískovaných vzorcích uvedené v tabulce 12. Hodnota $\Delta \sigma$ udává odchylku od naměřené hodnoty vznikající během měření.

Tabulka 12 - Naměřené hodnoty zbytkových napětí

Označení vzorku	Naměřené hodnoty zbytkového napětí			
	Hloubka $2\ \mu\text{m}$		Hloubka $4\ \mu\text{m}$	
	Referenční	Pískované	Referenční	Pískované
	$\sigma_i \pm \Delta \sigma$ [MPa]			
0104				
0116				
1007				
1009				
1904				
1916				

Na grafech níže je znázorněna závislost deformace (strain) na $\sin^2\psi$. Na základě znalosti směrnice přímky, Youngova modulu E a Poissonova poměru je následně vypočtena hodnota zbytkové napjatosti. Je-li směrnice pozitivní (graf 4.1), hodnota zbytkové napjatosti je tahová pokud má přímka negativní směrnici, zbytková napjatost povlaku je tlaková (graf 4.2). Během měření dochází i k poměrně značným odchylkám měření. Měření je ideálně akceptovatelné pokud odchylka nepřesahuje 10% ze jmenovité hodnoty napětí.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřeje jejich zveřejnění.

Graf 4.1 - Vyhodnocení napjatosti referenčního vzorku

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřeje jejich zveřejnění.

Graf 4.2 - Vyhodnocení napjatosti pískovaného vzorku

Z grafu 4.3 je patrné, že všechny vzorky po CVD depozici před povrchovou úpravou vykazují napětí v tahu. Rozptyl mezi jednotlivými hodnotami v obou měřených hloubkách je malý a průměrná hodnota napětí je MPa. Povrchovou úpravou pomocí technologie pískování referenčních vzorků byl změněn charakter zbytkové napjatosti ve všech vzorcích na tlaková napětí. Mezi jednotlivými hloubkami měření 2 a 4 μm pro pískované vzorky se vyskytují značné rozdílnosti ve velikosti zbytkových napětí. Nejvyšších hodnot napětí v tlaku se vyskytuje nejbližší k povrchu povlaku, kde působí vysoká kinetická energie abrazivních částic a dochází tedy k nejvyššímu ovlivnění povrchové vrstvy. Se vzrůstající hloubkou od povrchu povlaku hodnoty tlakových napětí klesají, což potvrzují obě křivky v grafu pro pískované vzorky. Napětí v hloubce 4 μm

vykazuje průměrné napětí v tlaku MPa. Vzhledem k omezení měřicího zařízení nebylo možné změřit hodnoty napětí v hloubce TiCN nebo v blízkosti substrátu, ale na základě získaným výsledků lze předpokládat, že použité médium Al_2O_3 se zrnitostí mesh s nastavenými procesní parametry neovlivňuje zbytkovou napjatost v blízkosti substrátu.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřije jejich zveřejnění.

Graf 4.3 - Průběh zbytkové napjatosti mezi referenčními a pískovanými vzorky

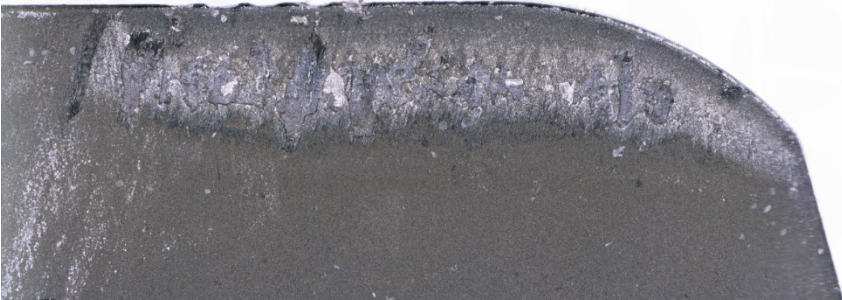
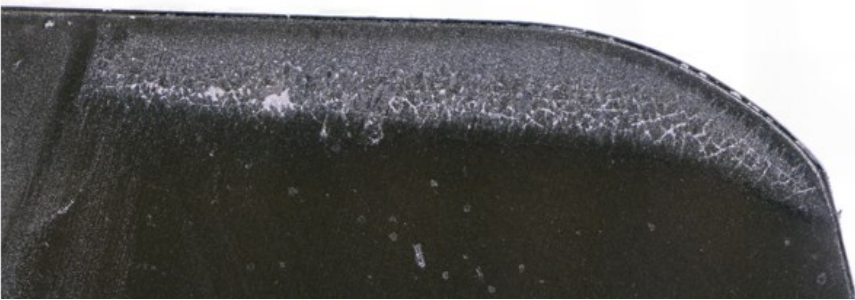

4.1.2 Vyhodnocení funkční zkoušky obrábění

Vyhodnocení opotřebení vzorků probíhalo vizuální kontrolou pomocí optického mikroskopu VHX-600 od výrobce Keyance. Hodnocen byl rozsah tepelných trhlin vznikajících podél ostří nástroje během přerušovaného řezu. Tyto trhliny nakonec způsobují vylamování karbidických částic, což následně vede k lomu VBD a tím ukončení její životnosti. Předpokládá se, že vlivem výskytu tahové napjatosti v povlaku řezného nástroje je šíření trhlin rychlejší a životnost nástroje klesá. Cílem bylo ověřit intenzitu šíření těchto trhlin pro různé hodnoty zbytkového napětí a do jaké míry tato napětí ovlivňují životnost nástroje. Celkem bylo provedeno 15 přejezdů na délce záběru $l=48$ mm pro jeden přejezd. Testovány byly 2 VBD od každého typu ze tří vzorku A, B a C (viz. tabulka 6). Opotřebení všech testovaných VBD bylo měřeno po 3, 5, 7, 9, 11, 13 a 15 přejezdech. V příloze A jsou uvedeny všechny snímky pořízené na optickém mikroskopu.

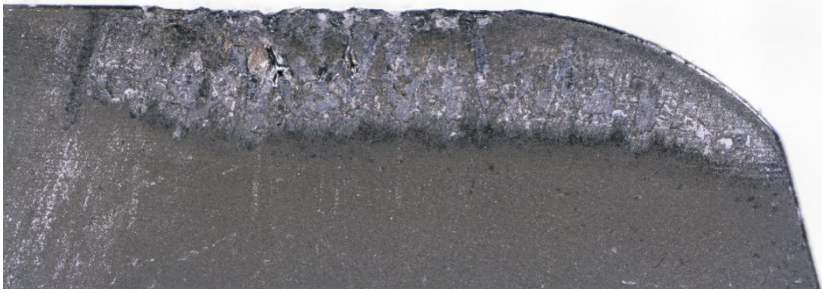
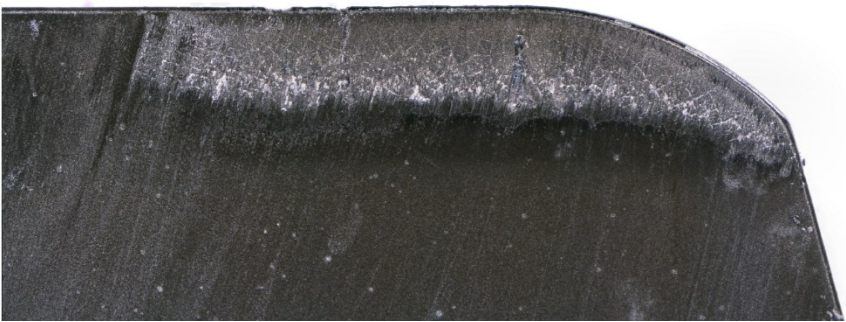
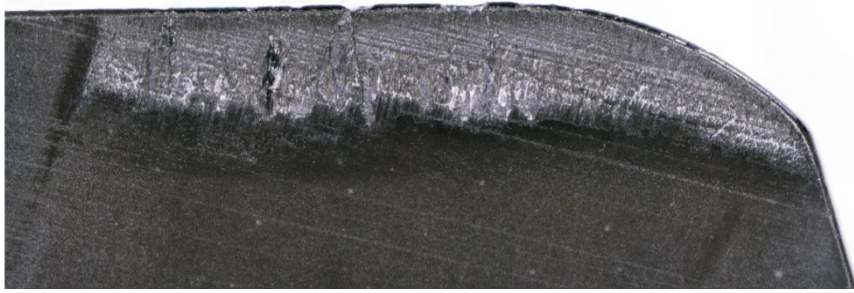
Na základě experimentálních výsledků funkční zkoušky obrábění bylo potvrzeno, že charakter a velikost zbytkového napětí ovlivňuje životnost řezného nástroje. V tabulkách níže jsou uvedeny snímky opotřebení po určitém počtu přejezdů frézy. U vzorku A s tahovou napjatostí lze pozorovat již po 3 přejezdech (tabulka 14) drobné vylamování částic na ostří, zatímco vzorky s tlakovým napětím B, C nevykazují žádné poškození břitu nástroje. Po 9 přejezdech (tabulka 15) již došlo k ukončení životnosti všech testovaných nástrojů

typu A. Vlivem vysoké koncentrace lokální tahové napjatosti došlo k rozsáhlému výskytu trhlin, které následně způsobily vylamování břitu nástroje. U vzorků B, C se již začíná objevovat mikrovýdrolování ostří. Při 15 přejezdech (tabulka 16) lze vidět mírný rozdíl opotřebení mezi nástroji s rozdílnou velikostí tlakového napětí. Vzorek B, kde vnesená tlaková napjatost byla téměř poloviční, vykazuje rozsáhlejší poškození ve formě odlomených karbidických částic oproti vzorku C. Z těchto dosažených výsledků lze vyvodit závěr, že životnost nástroje s CVD povlakem během přerušovaného řezu se s aplikací povrchové úpravy mokrým pískováním zvyšuje a to přibližně o 60 %. U vzorku C s vyšší hodnotou napětí v tlaku bylo opotřebení pomalejší než u vzorku B s téměř poloviční hodnotou tlakového napětí.


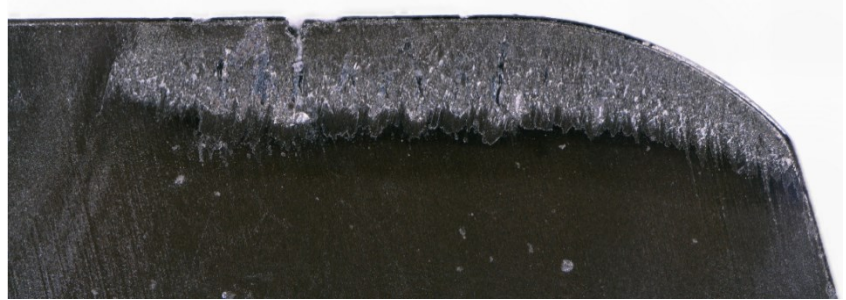
Tabulka 14 - Opotřebení vzorků po 3 přejezdech

A		
Referenční	[MPa]	
B		
Pískovaný	- [MPa]	
C		
Pískovaný	[MPa]	

Tabulka 15 - Opotřebení vzorků po 9 přejezdech

A		
Referenční	[MPa]	
B		
Pískovaný	[MPa]	
C		
Pískovaný	[MPa]	

Tabulka 16 - Opotřebení vzorků po 15 přejezdech

B		
Pískovaný	[MPa]	
C		
Pískovaný	[MPa]	

4.2 Vyhodnocení stability výrobního procesu

Ve funkční zkoušce obrábění bylo potvrzeno, že značně rozdílné hodnoty zbytkové napjatosti vykazují odlišnou úroveň životnosti řezného nástroje. Z tohoto důvodu bude v této části experimentu hodnocena stabilita procesu mokrého pískování respektive, zda všechny VBD dosahují podobné velikosti zbytkového napětí a tím i životnosti při předem daných nastaveních parametrů procesu mokrého pískování.

4.2.1 Vyhodnocení vlivu polohy VBD na zbytkovou napjatost

Na základě provedených testů, byla změřena a zkoumána velikost zbytkového napětí v závislosti na poloze VBD v přípravku (paletě). V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty zbytkové napjatosti v jednotlivých testech pro předem stanovené polohy VBD vyhodnocené v hloubkách 2 a 4 μm pod povrchem. Vzhledem ke značným odchylkám od naměřené hodnoty vznikající během měření pomocí rentgenové difrakce zbytkové napjatosti vlivem výskytu gradientu napětí je nutné uvažovat, že některé hodnoty mohou vykazovat nižší vypovídající výsledek.

Tabulka 17 - Naměřené hodnoty zbytkové napjatosti v jednotlivých testech

Pozice VBD		Test 1 (T1)	Test 2 (T2)	Test 3 (T3)	Test 4 (T4)	Test 5 (T5)
		$\sigma_i \pm \Delta \sigma$ [MPa]				
0104	Hloubka 2 μm					
0116						
1007						
1009						
1904						
1916						
0104	Hloubka 4 μm					
0116						
1007						
1009						
1904						
1916						

Pískování vzorků v jednotlivých testech bylo prováděno při nastavení konstatních parametrů pískování s krokem posuvu přípravku $f = 35\text{mm}$. Testy T1, T2, T3, T4, T5 (tabulka 17) byly prováděny s určitou časovou prodlevou, aby mohl být případně zaznamenán vliv vedlejších faktorů, které by mohly ovlivnit velikost zbytkové napjatosti. V testu 2 proběhlo pískování 4 paletek ihned za sebou, kdy se předpokládalo, že hodnoty

zbytkové napjatosti budou vykazovat nejvíce opakovatelné výsledky na jednotlivých pozicích. Naměřené hodnoty zbytkové napjatosti v testu 2 (T2) jsou uveřejněny v tabulce 18.

Tabulka 18 - Naměřené hodnoty zbytkové napjatosti v testu 2

Pozice VBD		Test 2			
		Paleta 1 (T2/P1)	Paleta 2 (T2/P2)	Paleta 3 (T2/P3)	Paleta 4 (T2/P4)
		$\sigma_i \pm \Delta \sigma$ [MPa]			
0104	Hloubka 2 μm				
0116					
1007					
1009					
1904					
1916					
0104	Hloubka 4 μm				
0116					
1007					
1009					
1904					
1916					

V následujících grafech (graf 4.4 a 4.3) jsou vyneseny hodnoty zbytkové napjatosti pro zkoumané pozice ve všech prováděných testech v obou měřených hloubkách 2 a 4 μm . Křivky v grafech vykazují jednoznačnou nestabilitu výrobního procesu, kdy mezi jednotlivými hodnotami zbytkové napjatosti lze sledovat určité odchylky. Rozdíly mezi naměřenými daty vykazuje i test 2, kde bylo provedeno pískování několika palet za sebou, a kde byl předpoklad, že hodnoty zbytkové napjatosti na jednotlivých pozicích budou vykazovat nejvyšší opakovatelnost výrobního procesu.

Z dosažených výsledků je zřejmé, že u všech vzorků se vyskytuje tlaková zbytková napjatost, přičemž maximální hodnota napětí v tlaku v hloubce 2 μm činí MPa pro pozici VBD 1916 v T2/P2 a minimální hodnota MPa na pozici 1007 v T5. Rozdíl mezi těmito hodnotami činí MPa. Pokud by tedy VBD ve výrobní dávce vykazovaly tyto značné rozdíly ve velikosti napjatosti, jejich životnost v reálném procesu by byla odlišná. V případě měřené hloubky 4 μm bylo dosaženo maximálního hodnoty napětí v tlaku u pozice 1904 v T2/P2 a to MPa zatímco nejnižší hodnota byla získána rovněž na poloze 1007, kdy změřená velikost zbytkové napjatosti dosahovala pouze hodnoty MPa.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřeje jejich zveřejnění.

Graf 4.4 - Průběh zbytkové napjatosti v T2 v hloubce 2 μm

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřeje jejich zveřejnění.

Graf 4.5 - Průběh zbytkové napjatosti v T2 v hloubce 4 μm

Byla pozorována určitá závislost mezi hodnotami napětí v měřených hloubkách 2 a 4 μm . V grafu 4.6 je uveden průběh zbytkové napjatosti vzorku na pozici 1007 v obou sledovaných hloubkách. Z křivek je zřejmé, že se vzrůstající hloubkou od povrchu se zbytková napjatost v tlaku zmenšuje, což potvrzují dřívější studie o tom, že pískovací médium ovlivňuje napětí v hloubce nejbližší k povrchu. Tento trend byl prokázán

pro všechny testované pozice ve veškerých provedených testech. Grafické znázornění průběhu zbytkové napjatosti pro jednotlivé pozice jsou uvedeny v příloze B. Z této prokázané závislosti mezi oběma hloubkami bylo doporučeno pro další experimenty měřit zbytkové napětí pouze v hloubce 2 μm . Tím bude získána značná úspora času vzhledem k faktu, že napětí v jedné hloubce pro jednu VBD pomocí metody rentgenové difrakce použité v této studii trvá přibližně dvě hodiny.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřeje jejich zveřejnění.

Graf 4.6 - Průběh zbytkové napjatosti na pozici 1007

Pro lepší přehlednost dosažených výsledků zbytkové napjatosti pro zkoumané pozice byl zpracován graf 4.7. V grafu jsou zaznamenány hodnoty zbytkového napětí daných pozic VBD ve všech provedených testech. Z grafického zpracování je patrné, že některé pozice vykazují opakovatelný trend v jednotlivých testech. U VBD na pozici 1007 byl zaznamenán ve většině testů výrazný pokles zbytkového napětí oproti ostatním pozicím. Pozice 1009, která je v přípravku umístěna téměř v těsné blízkosti pozice 1007 vykazuje zhruba o čtvrtinu vyšší napětí než VBD uložená na pozici 1007. V reálných podmínkách to tedy znamená, že u pozice 1009 dochází k intenzivnějšímu pískování oproti pozici 1007. Krajní polohy 0116, 1916 a 0104, 1904 vykazují rovněž určité odchylky. Na krajní pozici 1904 dochází v určitých testech ke zvýšení napětí. To by mohlo například značit, že při nájezdu/výjezdu trysek se trysky mohou na určitou dobu zastavit a tím dochází ke zvýšené intenzitě pískování. V testu 5 bylo dosaženo minimálních hodnot zbytkové napjatosti v tlaku, kdy průměrná hodnota napětí činila MPa. Tento pokles oproti jiným testům by mohl být zapříčiněn například poruchou stroje nebo mohla nastat výměna pískovacího média, které by mohlo na povrch VBD působit rozdílnou intenzitou než médium opotřeбенé.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřeje jejich zveřejnění.

Graf 4.7 – Průběh zbytkové napjatosti v hloubce 2 μm

Pro získání informace, která pozice vykazovala nejvíce opakovatelné výsledky vnesené tlakové napjatosti, a zda mezi jednotlivými pozicemi existuje určitá závislost, bude aplikován výpočet směrodatné odchylky, podle které bude vyjádřena míra rozptýlenosti hodnot zbytkové napjatosti od průměrné hodnoty napětí.

Výběrový průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4.1)$$

kde: n ...počet provedených měření

x_i ...naměřená hodnota zbytkové napjatosti

Směrodatná odchylka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

V tabulce 19 jsou uvedeny hodnoty výběrového průměru \bar{x} a směrodatné odchylky σ zbytkového napětí pro zkoumané pozice vypočteny ze všech realizovaných testů (T1 až T5). Hodnota směrodatné odchylky udává informaci o tom, na které pozici bylo dosaženo nejvyšší opakovatelnosti výrobního procesu (tzn., která pozice vykazovala nejvíce

stabilní úroveň velikosti napětí). Nižší hodnota směrodatné odchylky značí vyšší úroveň opakovatelnosti velikosti napětí na dané pozici.

Tabulka 19 - Hodnoty výběrového průměru a směrodatné odchylky pro dané pozice

Hloubka měření [μm]	Parametr [MPa]	Pozice					
		0104	0116	1007	1009	1904	1916
2	\bar{x}						
	σ						
4	\bar{x}						
	σ						

Z grafu 4.8 je patrné, že nejvyšší opakovatelnosti bylo dosaženo u VBD uložených na pozici 1007. Zároveň na této pozici byla zaznamenána nejnižší průměrná hodnota napětí v tlaku MPa v měřené hloubce 2 μm. Naopak na pozici 0104 dosahovala hodnota směrodatné odchylky maximální hodnoty, což značí poměrně nízkou opakovatelnost velikosti vneseného napětí.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřeje jejich zveřejnění.

Graf 4.8 - Směrodatná odchylka zbytkového napětí zkoumaných pozic

Pro srovnání opakovatelnosti výsledků zbytkového napětí byly do grafu 4.9 vyneseny hodnoty směrodatné odchylky pouze v T2 (tzn. T2/P1, T2/P2, T2/P3, T2/P4), kde proběhlo pískování několika palet ihned po sobě, čímž by měla být vyloučena případná porucha stroje nebo jiný ovlivňující faktor, který by mohl snížit stabilitu procesu. Z dosažených výsledků lze konstatovat, že opakovatelnost vnesené zbytkové napjatosti je značně vyšší v porovnání

s testy, které probíhaly s určitou časovou prodlevou. S výjimkou pozice 0116, kde hodnota směrodatné odchylky razantně stoupla, byla na ostatních pozicích vykázána poměrně vysoká opakovatelnost v porovnání s grafem 4.7.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřeje jejich zveřejnění.

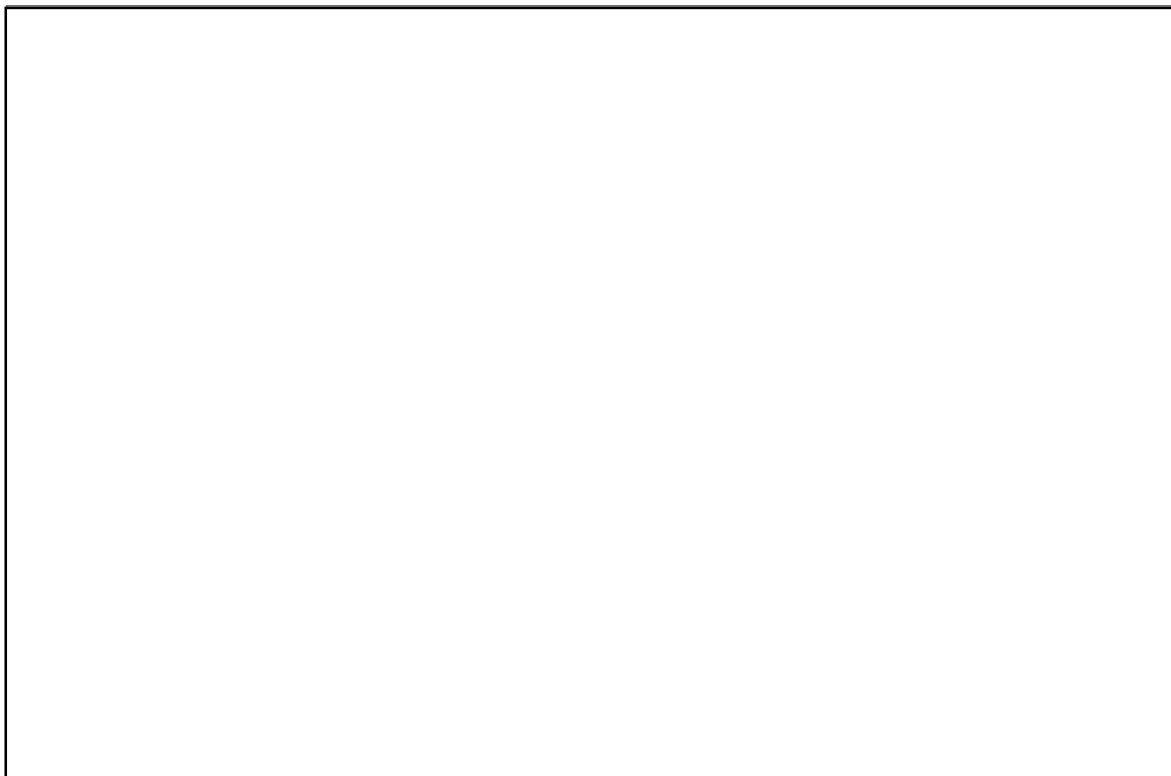
Graf 4.9 - Směrodatná odchylka zbytkového napětí zkoumaných pozic během T2

V tabulce 20 jsou uvedeny hodnoty výběrového průměru a směrodatné odchylky zbytkové napjatosti pro jednotlivé testy. Hodnota výběrového průměru je vypočítána ze všech 6 testovaných pozic v daném testu, kdy cílem bylo zjistit, ve kterém provedeném testu bylo dosaženo nejvyšší opakovatelnosti (resp., jaká nastala odchylka ve velikosti napětí u 6 sledovaných pozic během jednoho testu.)

Tabulka 20 - Hodnoty výběrového průměru a směrodatné odchylky

Test	Hloubka 2 [μm]		Hloubka 4[μm]	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
	[MPa]			
T1				
T2/P1				
T2/P2				
T2/P3				
T2/P4				
T3				
T4				
T5				

Poměrně vysoká míra opakovatelnosti byla zaznamenána u testů T3 a T5. Ostatní testy vykazovaly relativně zvýšenou rozptýlenost hodnot zbytkové napjatosti mezi jednotlivými pozicemi VBD kolem průměrné hodnoty napětí. Nejvyšší nestabilita velikosti zbytkového napětí byla dosažena u T2/P4, kde maximální rozdíl mezi napětím na pozici 0104 a 1007 činil MPa. Při tomto rozdílu napětí byla již ve funkční zkoušce obrábění viditelná rozdílnost v životnosti nástrojů během řezného procesu.



Graf 4.10 - Směrodatná odchylka zbytkové napjatosti v provedených testech

V této části experimentu bylo potvrzeno, že se projevuje určitá nestabilita ve velikosti zbytkové napjatosti během povrchové úpravy deponovaného nástroje pomocí technologie mokrého pískování. Zkoumané vzorky VBD vykazovaly na sledovaných pozicích určité odchylky ve velikosti zbytkové napjatosti. Tato skutečnost může vést při aplikaci řezného nástroje k rozdílné životnosti totožných nástrojů. Z dosažených a vyhodnocených výsledků byly vyvozeny 3 možné příčiny, které danou nestabilitu mohly způsobit:

1. Parametr kroku posuvu přípravku f

- Tento parametr udává posuv přípravku (palety) o předem nastavenou hodnotu ve směru kolmém na pohyb trysek. V předešlém experimentu byl krok posuvu nastaven na hodnotu . To znamená, že při jednom přejetí trysek a pískování po celé délce přípravku s uloženými VBD dojde k posuvu přípravku o tuto hodnotu a k následnému přejetí trysek. Problém může nastat pokud je tento posuv nastaven příliš na vysokou nebo naopak na nízkou hodnotu, a tím dochází k různé intenzitě pískování. Tento faktor byl pozorován u vzorků uložených na pozicích 1007 a 1009. Tyto pozice byly v téměř těsné

blízkosti vedle sebe a přesto zde byla zaznamenána značná rozdílnost ve velikosti vnesené napjatosti.

2. Vliv pískovacího média

3. Porucha stroje

- K ovlivnění velikosti zbytkového napětí během pískovacího procesu může přispět i porucha stroje. Tento jev je poměrně nepředvídatelný a lze mu předcházet pravidelnou údržbou a kontrolou stroje.

4.2.2 Vliv změny parametrů mokrého pískování na zbytkovou napjatost

Z provedených a následně vyhodnocených testů byly zjištěny opakované rozdíly v hodnotách vnesené zbytkové napjatosti na zkoumaných pozicích VBD. Z tohoto důvodu došlo k experimentální úpravě v nastavení parametrů metody pískování, za účelem snížení rozdílů v hodnotách zbytkového napětí u jednotlivých vzorků. Byla snížena hodnota kroku posuvu přípravku na hodnotu , s cílem rovnoměrnějšího pískování celého teoretického povrchu přípravku. Snížená hodnota kroku posuvu v reálných podmínkách znamená delší dobu pískování vzorků. Z tohoto důvodu bylo pro experiment použito pouze trysek oproti programu 1, kde bylo použito trysek při dvojnásobné hodnotě kroku posuvu. Při tomto nastavení se předpokládalo vnesení tlakového napětí o stejných hodnotách jako při původním nastavení procesu pískování (program 1) a vyšší stabilita procesu oproti předchozímu nastavení.

Tabulka 21 - Naměřené hodnoty pro nastavení programu 2

Program 2		
f=		
Pozice	Test 1	Test 2
	Hloubka 2 μm	
	$\sigma_i \pm \Delta \sigma$ [MPa]	
0104		
0116		
1007		
1009		
1904		
1916		

Z naměřených dat lze konstatovat, že snížením kroku posuvu na poloviční hodnotu a vypnutím trysek, klesla i zbytková napjatost na všech sledovaných pozicích téměř o třetinu, oproti velikosti napětí při kroku posuvu mm v programu 1. Mezi maximální a minimální hodnotou zbytkového napětí byl naměřen rozdíl MPa, zatímco při nastavení programu 1 tento rozdíl činil MPa. Nejvýznamnější rozdíl mezi jednotlivými pozicemi nastal u VBD na pozici 1007. V předešlých testech tato pozice vykazovalo oproti ostatním uloženým VBD značný rozdíl ve velikosti napětí. Průměrná hodnota napětí v programu 2 dosahovala pouze MPa a směrodatná odchylka činila MPa, což lze považovat za poměrně vysokou úroveň opakovatelnosti procesu. Změnou nastavení kroku posuvu přípravku v programu 2, bylo tedy dosaženo vyšší opakovatelnosti hodnot vneseného napětí, ale současně došlo ke snížení tlakové napjatosti v povrchu VBD, a to téměř o třetinu oproti programu 1.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřejí jejich zveřejnění.

Graf 4.11 - Průběh zbytkové napjatosti v programu 2

Z tohoto důvodu byl pro zvýšení intenzity tlakového napětí ve vzorcích VBD aplikován program 3. Zde byla rovněž hodnota posuvu nastavena na mm s tím rozdílem, že bylo spuštěno všech trysek, čímž by měla být zajištěna dvojnásobná intenzita pískování oproti programu 2 a zároveň zachována opakovatelnost procesu. Výsledky naměřených dat jsou uvedeny v tabulce 23. V porovnání s programem 2, bylo dosaženo spuštěním trysek zvýšení tlakové napjatosti. Průměrná hodnota napětí při takto nastavených parametrech činila MPa, zatímco v programu 2 tato hodnota dosahovala velikosti pouze MPa. Výpočtem směrodatná odchylky bylo ověřeno, že zaručení opakovatelnosti tlakových napětí na všech pískovaných pozicích je téměř srovnatelné s programem 2.

Tabulka 22 - Naměřené hodnoty pro nastavení programu 3

Program 3	
f = 17,5 mm / 16 trysek	
Pozice	Hloubka 2 μm
	$\sigma_i \pm \Delta \sigma$ [MPa]
0104	
0116	
1007	
1009	
1904	
1916	

Z výše uvedených výsledků je patrné, že mezi všemi nastavenými programy se vyskytovaly určité rozdílnosti ve velikosti napětí i v opakovatelnosti vneseného napětí do povrchu VBD. Tabulka 23 shrnuje výsledky průměrné velikosti dosaženého napětí na daných pískovaných pozicích a směrodatnou odchylku, která charakterizuje úroveň opakovatelnosti hodnoty zbytkové napjatosti.

Tabulka 23 - Shrnutí velikosti průměrné hodnoty napětí a směrodatné odchylky

Typ programu	Program 1	Program 2	Program 3
	[mm/počet trysek]		
	f =	f =	f =
\bar{x}	[MPa]		
σ			

V rámci pískování vzorků programem 1 bylo dosaženo poměrně vysoké hodnoty zbytkového napětí, ale opakovatelnost výrobního procesu oproti ostatním nastaveným programům byla nejnižší. Naopak program 2 zaručoval nejvyšší opakovatelnost vnesené napjatosti, ale na úkor nejnižší průměrné hodnoty napětí v tlaku. Z tohoto důvodu byl nastaven program 3, kde došlo ke zvýšení intenzity pískování, která vedla k nárůstu napětí v povrchové vrstvě VBD. Výsledkem této změny programu byla průměrná hodnota napětí v tlaku) MPa, což značí nejvyšší zaručení životnosti rezného nástroje. V grafu 4.12 jsou uvedené křivky znázorňující průběh zbytkové napjatosti na jednotlivých pozicích

pro všechny tři varianty nastavení programů pískování. Tímto experimentem bylo potvrzeno, že vhodným nastavením parametrů lze měnit intenzitu vneseného napětí i stabilitu výrobního procesu. K získání co nejvíce vypovídajících výsledků je nutné provést další testování většího počtu vzorků a jejich následné vyhodnocení.

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřije jejich zveřejnění.

Graf 4.12 - Porovnání průběhu zbytkové napjatosti v testovaných programech

4.2.3 Vyhodnocení vlivu pískovacího média na zbytkovou napjatost

V této podkapitole bude sledován vliv pískovacího média Al_2O_3 o zrnitosti mesh na velikosti zbytkového napětí v povrchové vrstvě VBD. V předchozích experimentech byla v několika provedených testech vysledována nízká míra opakovatelnosti hodnot vneseného napětí na určitých pozicích VBD. Mezi příčiny, které se na dané nestabilitě mohly podílet, byl zařazen právě i účinek pískovacího média.

V důsledku dopadu abrazivních částic o vysoké kinetické energii na povrch nástroje dochází k postupnému opotřebení pískovacího média. Abrazivní částice se po určité provozní době používání rozpadají na jemný prach a musí dojít k jejich následné výměně. Stroj je vybaven speciálním separačním systémem, který dokáže tyto jemné částice odfiltrovat. Tento proces probíhá automaticky nepřetržitě během chodu stroje. Životnost média závisí na několika faktorech, zejména na hodnotě tlaku vzduchu, tvrdosti pískovaného povrchu a době pískování. Z tohoto důvodu byl v této části práce zkoumán účinek pískovacího média na začátku a v průběhu jeho životnosti. Experiment byl rozdělen do dvou testů. V prvním testu byly vzorky pískovány novými abrazivními částicemi Al_2O_3 , přičemž pro každou paletu (přípravek) s uloženými VBD byl nastaven jiný parametr kroku posuvu přípravku. V druhém testu proběhlo pískování vzorků médiem, které již týden bylo v provozu a probíhalo jím pískování VBD, takže vykazovalo určitou úroveň opotřebení. Získaná data z obou testů jsou zaznamenána v tabulce 23.

Tabulka 23 - Velikost zbytkové napjatosti

Krok posuvu / počet trysek [mm]	Test 1 Nové médium (22. 4. 2020)		Test 2 Opotřebené médium (29. 4. 2020)	
	Hloubka 2	Hloubka 4	Hloubka 2	Hloubka 4
	[μm]			
	[MPa]			

Z vyhodnocených výsledků uvedených v grafu 4.13 je zřejmé, že postupným . Vzorky pískované

. V hloubce 2 μm činí průměrná hodnota rozdílu napětí mezi vzorky pískovanými novým a opotřebeným médiem MPa. V hloubce 4 μm lze zaznamenat u pískování novým médiem výrazný posun zbytkového napětí směrem k tahovým hodnotám. Z těchto dosažených výsledků je patrné, že při aplikaci

Vynechaná místa obsahují informace, které jsou výhradním majetkem společnosti Dormer Pramet s.r.o. a ta si nepřije jejich zveřejnění.

Graf 4.13 - Průběh zbytkové napjatosti mezi novým a opotřebeným médiem

Výsledky tohoto experimentu vedou k závěru,

Hlavním cílem je nastavit parametry tak, aby byla zajištěna opakovatelná hodnota vneseného zbytkového napětí pro všechny VBD.

V této části experimentu bylo provedeno i pískování VBD pomocí média Al_2O_3 o zrnitosti , který měl odlišné uspořádání trysek než původní stroj, a který ve firmě Dormer Pramet s.r.o. slouží VBD. Úkolem bylo zjistit, zda na tomto stroji je možné provádět povrchovou úpravu po depozici řezného nástroje s cílem vnesení tlakových napětí do povrchu. V tabulce 24 jsou uvedeny naměřené hodnoty napětí vzorků pískovaných na tomto stroji při nastavení stejných procesních parametrů jako u programu 3. Předpokládalo se, že vyšší zrnitostí média, která obecně značí větší velikost abrazivních částic, se dosáhne zvýšení tlakových napětí. Z výsledků je ale patrné, že u testovaných vzorků bylo dosaženo tahové a nízké tlakové napjatosti. Vzhledem k takto značným rozdílům ve změně charakteru napjatosti se nepředpokládá, že by tento jev byl způsoben odlišnou zrnitostí média. Pravděpodobnou příčinou by mohlo být jiné uspořádání trysek, které mají jiný úhel dopadu abrazivního média než je tomu na původním stroji. Vzhledem k tomu, že tento dílčí experiment nebyl hlavním cílem této práce, tak již neprobíhalo další řešení této problematiky.

Tabulka 24 - Velikost zbytkové napjatosti vzorků pískovaných Al_2O_3

Pozice	Hloubka 2	Hloubka 4
	[μm]	
	$\sigma_t \pm \Delta \sigma$ [MPa]	
0104		
0116		
1007		
1009		

ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Přítomnost zbytkového napětí v deponované vrstvě řezných nástrojů představuje problém z hlediska jeho spolehlivosti a životnosti v řezném procesu. Tato práce zkoumá vývoj zbytkové napjatosti v nástrojích ze slinutého karbidu v povlacích nanesených metodou CVD, ve kterých se vyskytuje značné napětí v tahu, které způsobuje výrazné snížení úrovně životnosti, zejména pak u přerušovaného řezu. Pokud tahové zbytkové napětí v povlaku dosáhne kritických hodnot, začnou se vytvářet trhliny, které mohou vést k vydrolování karbidických částic na ostří a následnému lomu. Z tohoto důvodu je nutné do výrobního procesu zařadit operaci povrchové úpravy po depozici nástroje, která slouží k eliminaci těchto napětí a prodlužuje životnost nástroje.

V experimentální části byla pozornost zaměřena na povrchovou úpravu CVD povlaku metodou mokrého pískování. Práce se věnovala především vlivu této technologie na vývoj zbytkové napjatosti v povlaku a dále výzkumu z hlediska zajištění stability výrobního procesu. Byl zkoumán účinek zbytkových napětí v povrchové vrstvě VBD a sledována opakovatelnost výrobního procesu s cílem zajištění stejné životnosti (resp. stejné hodnoty vneseného napětí) v povrchových vrstvách všech VBD pomocí vhodného nastavení parametrů pískování a dále pak vytipování hlavních faktorů, které mohou negativně ovlivňovat stabilitu procesu.

Z provedených experimentů, které v této práci byly provedeny lze vyvodit následující závěry:

1. Měřením pomocí rentgenové difrakční tenzometrie bylo potvrzeno, že zbytková napjatost v nástrojích ze slinutého karbidu deponovaných CVD metodou dosahovala značné tahové zbytkové napjatosti s průměrnou hodnotou napětí MPa. Po provedení povrchové úpravy mokrým pískováním bylo do povrchové vrstvy vneseno napětí v tlaku pomocí abrazivních částic média Al_2O_3 o zrnitosti mesh.
2. Funkční zkouškou obrábění bylo potvrzeno, že povrchová úprava mokrým pískováním zvyšuje životnost řezného nástroje s CVD povlakem při přerušovaném řezu. Hlavní příčinou selhání nástroje byla tvorba tepelných trhlin šířících se kolmo na ostří nástroje. Se zvyšující se koncentrací trhlin na břitů nástroje docházelo k vylamování karbidických částic na ostří nástroje, což vedlo k jeho lomu a ukončení životnosti. Vzorky před povrchovou úpravou s tahovou napjatostí vykazovaly zhruba o 60% nižší životnost než vzorky s vneseným tlakovým napětím po mokrém pískování. Rozdíl mírně zvýšené životnosti byl pozorován i mezi nástroji, které měly vnesenou jinou velikost zbytkové napjatosti. VBD s tlakovým napětím MPa dosahovala nižší hodnoty opotřebení během řezného procesu než VBD s téměř poloviční velikostí napětí MPa.

3. V další části výzkumu byla pozornost zaměřena na metodu mokrého pískování v oblasti stability procesu. Zajištěním opakovatelnosti z hlediska vnesení stejné velikosti zbytkové napjatosti do VBD je důležité z pohledu zaručení rovnoměrné životnosti všech VBD v dané výrobní dávce. Velikost zbytkového napětí byla sledovaná na 6 různých pozicích VBD uložených v přípravku. Tyto pozice byly vybrány s ohledem na předpokládaný výskyt rozdílů ve velikosti hodnot měřené tlakové napjatosti. Provedenými testy a jejich vyhodnocením bylo prokázáno, že dané pozice vykazují určité odchylky, a tím tedy i nestabilitu procesu. Na základě těchto získaných výsledků byly určeny možné příčiny, kterou danou nestabilitu mohly způsobit, a které byly následně zkoumány.
4. Jeden ze zkoumaných faktorů ovlivňující stabilitu procesu pískování byl krok posuvu přípravku f . Při původním nastavení, kdy hodnota posuvu činila \dots , byly vyzorovány poměrně vysoké odchylky ve velikosti zbytkového napětí. Z tohoto důvodu byl program upraven na poloviční hodnotu kroku posuvu \dots . Takto upravený program zajišťoval značně vyšší stabilitu procesu a zároveň i vyšší tlakové napětí v povrchové vrstvě VBD zaručující vysokou životnost nástroje. Průměrná hodnota napětí v původním programu činila \dots MPa a směrodatná odchylka \dots MPa. Úpravou programu se dosáhlo průměrné hodnoty napětí \dots MPa a směrodatné odchylky \dots MPa, která vykazovala dvojnásobně vyšší opakovatelnost výrobního procesu. Výsledky jasně potvrzují, že při nevhodně zvolené hodnotě kroku posuvu nastává značná nestabilita procesu z důvodu výskytu míst, kde dochází k nerovnoměrnému pískování povrchu VBD.
5. V dílčí části praktické části bylo zkoumáno, zda postupné opotřebení pískovacího média ovlivňuje výrobní stabilitu procesu. Experimentem bylo potvrzeno, že nové médium \dots jako médium, které projevuje určitou úroveň opotřebení. Zbytková napjatost během pískování vzorků

Tím lze ještě více zajistit opakovatelnost výrobního procesu.

Závěrem lze říci, že úpravou procesních parametrů technologie mokrého pískování lze zvýšit stabilitu výrobního procesu a zároveň ovládat velikost vnesené zbytkové napjatosti do povrchu nástroje. Otázkou však stále zůstává, jaké jsou optimální parametry technologie mokrého pískování, které zaručují kombinaci nejvyšší možné hodnoty tlakového napětí poskytující vysokou životnost a současně stabilitu procesu. Z tohoto důvodu je nutné realizovat další experimenty v této oblasti, které by přinesly další množství výsledků na tuto problematiku.

.

..

Poděkování

Touto cestou bych chtěla vřele poděkovat firmě Dormer Pramet, s.r.o., za umožnění vypracování mé diplomové práce a zapojení do výzkumu v oblasti zbytkové napjatosti v řezných nástrojích ze slinutého karbidu. Děkuji především panu Ing. Ondřeji Vortelovi, za jeho ochotu, trpělivost a vstřícný přístup při společných konzultacích. Rovněž bych chtěla poděkovat panu Ing. Petru Flašarovi za pomoc při získání potřebných dat k vypracování experimentální části této diplomové práce.

Velké díky rovněž patří panu prof. Dr. Ing. Ivanu Mrkvicovi za jeho odborné vedení, podnětné rady a připomínky k této práci.

Diplomová práce byla vypracována za podpory projektu: „Specifický výzkum inovativních technologií výroby“, reg. č. „SP2020/27“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Odvrtávací metoda (metoda otvoru)*. [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <https://tp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/detaily-metody#anchor-restress>
- [2] **GANEV N., KRAUS I.** *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí*. [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: https://www.xray.cz/xray/csca/kol2002/doc/nikolaj_ganev2.htm
- [3] **KŘÍŽ, A.** *Vliv povrchu na užité vlastnosti výrobku*. 2011. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/16376/1/Kriz.pdf>
- [4] **KYNCL, Ladislav.** *Analýza vybraných parametrů integrity povrchu při nepravidelném přerušovaném řezu*. Disertační práce. Ostrava, 2017. 123s.
- [5] **KŘÍŽ, A., et al.** *Integrita povrchu ostří nástroje ze slinutého karbidu*. 2015. Plzeň: 2015. ZČU, Katedra materiálu a strojírenské metalurgie [cit. 03-03-2020]. Dostupné z: http://ateam.zcu.cz/download/kriz_str_tech_2015_text.pdf
- [6] *Trendy v povlakování slinutých karbidů*, MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.ht>
- [7] **KŘÍŽ, A.** *Nové trendy vývoje tenkých vrstev vytvořených PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje*. [online]. [cit. 03-03-2020]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/15193096-Nove-trendy-vyvoje-tenkych-vrstev-vytvorenych-pvd-a-cvd-technologie-v-aplikaci-na-rezne-nastroje-antonin-kriz.html>
- [8] **DENKANA, B., B. BREIDENSTEIN.** *Residual Stress Distribution in PVD-Coated Carbide Cutting Tools-Origin of Cohesive Damage*. Leibniz Universität Hannover, Germany, Institute of Production Engineering and Machine Tools.
- [9] **BREIDENSTEIN, B; DENKANA, B.** *Significance of residual stress in PVD-coated carbide cutting tools*. CIRP Annals, 2013, 62.1: 67-70.
- [10] **SLANINKOVÁ, A:** *Analýza současného stavu technologií úprav ostří řezných nástrojů ze slinutého karbidu*: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 59 s.
- [11] **SUCHÁNEK, J.** *Možnosti zvýšení životnosti nástrojů pro plošné tváření*. [online]. [cit. 05-03-2020]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32012/moznosti-zvyseni-zivotnosti-nastroju-pro-plosne-tvareni.html>
- [12] **TEIXERIA, V.** *Mechanical Integrity in PVD coatings due to the presence of residual stresses*. Thin Solid Films, 2001, 392.2: 276-281.

- [13] **HOLMBERG, K., RONKAINEN, H., LAUKKANEN, A., WALLIN, K., HOGMARK, S., JACOBSON, S., STÅHLE, P.** *Residual stresses in TiN, DLC and MoS2 coated surfaces with regard to their tribological fracture behaviour.* Wear. (2009). 267(12), 2142 – 2156.
- [14] **J.-D. KAMMINGA, TH.H. DE KEIJSER, R. DELHEZ, E.J. MITTEMEIJER.** *On the origin of stress in magnetron sputtered TiN layers* J. Appl. Phys., 88 (2000), pp. 6332-6345.
- [15] **SANDVIK COROMANT.** *Povlakování řezných nástrojů.* [online]. [cit. 2019-03-12]. <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/technologies.aspx>
- [16] **BUMBÁLEK, B.** *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci.*
- [17] **BREIDENSTEIN, B. a DENKENA, B.** *Residual stress depth distributions in uncoated, PVD coated.* Institute of Production Engineering and Machine Tools, Leibniz Universität Hannover, Germany. 2008
- [18] **SANDVIK COROMANT.** *Řezné materiály.* [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [19] **LANYING, Z., JIANGTO, N., QINGDI, H.** *Study on failure mechanism of the coated carbide tool.* International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 25 (2007). pp. 1-5. ISSN 0263-4368.
- [20] **CHOY, I. K.** *Chemical vapour deposition (CVD) – Advances, Technology, and Applications.* First Edition. Group 2018. ISBN 978-1-4665-9776-1.
- [21] **HUMÁR, A.** *Materiály pro řezné nástroje.* Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. IBSN 978-80-254-2250-2.
- [22] **BOING, D., DE OLIVEIRA, A., SCHROETER, R.** *Evaluation of wear mechanisms of PVD and CVD coatings deposited on cemented carbide substrates applied to hard turning.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-11.
- [23] **SKORDARIS, G., et al.** *Effect of PVD film's residual stresses on their mechanical properties, brittleness, adhesion and cutting performance of coated tools.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017, 18: 145-151.
- [24] *Residual stress Measurement by X-Ray Diffraction.* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.stresstech.com/en/knowledge/articles/stresstech-bulletin-12-measurement-methods-residual-stresses/>

- [25] **OLADIJO, O. P., et al.** *X-ray diffraction measurement of residual stress in WC-Co thermally sprayed coatings onto metal substrates. Surface and Coatings Technology.* 2012, 206.23: 4725-4729.
- [26] **KUMAR, A.; WELZEL, U.; MITTEMEIJER, E. J.** A method for the non-destructive analysis of gradients of mechanical stresses by X-ray diffraction measurements at fixed penetration/information depths. *Journal of applied crystallography*, 2006, 39.5: 633-646.
- [27] **VÁVRA, V., PINKAS, J.** *Identifikace materiálů pomocí metod rentgenové práškové difrakce.* [online]. [cit. 2020-10-03]. Dostupné z: <https://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf>.
- [28] **ZHONG, Zhi-Qiang, et al.** *Cutting performances and the related characteristics of CVD coated hardmetal inserts changed by post-treatments.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, 70: 162-168.
- [29] *What is wet blasting? Vapormatt. Wet Blasting and Surface Treatments.* [online]. [cit. 25. 03. 2020]. Dostupné z: <https://www.vapormatt.com/our-technology/what-wet-blasting>
- [30] **TKADLETZ, Michael, et al.** Residual stress gradients in α -Al₂O₃ hard coatings determined by pencil-beam X-ray nanodiffraction: The influence of blasting media. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 262: 134-140.
- [31] **SCHALK, N., et al.** Dry-blasting of α - and κ -Al₂O₃ CVD hard coatings: friction behaviour and thermal stress relaxation. *Tribology Letters*, 2013, 52.1: 147-154.
- [32] **KLOCKE, Fritz, et al.** *Tool life increase of coated carbide tools by micro blasting.* *Production Engineering*, 2009, 3.4-5: 453.
- [33] **KOVOSVIT MAS. MCV 1270 Power.** [online]. [cit. 10. 03. 2020]. Dostupné z: World Wide Web: <http://www.kovosvit.cz/cz/mcv-1270/>
- [34] **SLANINKOVÁ, A:** *Změny zbytkových napětí v povrchových vrstvách VBD po aplikaci povrchových úprav: Diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 76. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Ivan Mrkvica.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A - Průběh opotřebení testovaných řezných nástrojů během funkční zkoušky obrábění

Příloha B - Grafické zpracování průběhu zbytkové napjatosti na sledovaných pozicích